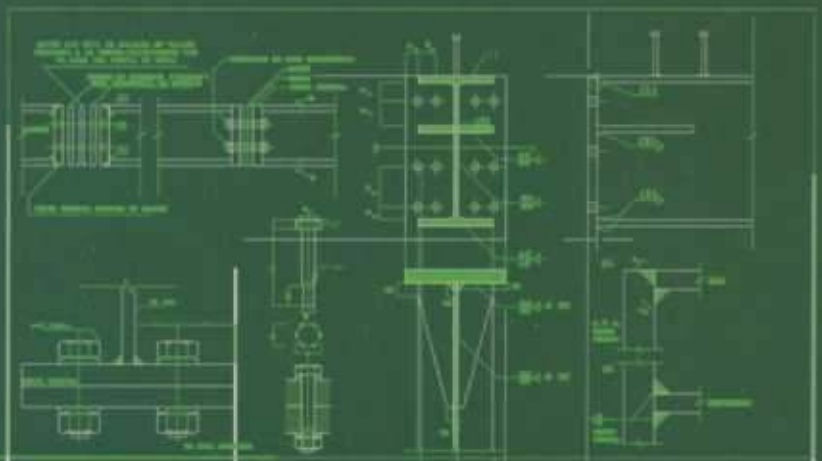
manual de uniones atornilladas frontales pretensadas



CatedrAcero

publicaciones APTA

Jesús Ortiz
J. Ignacio Hernando
Jaime Cervera

Las hojas de cálculo se pueden descargar gratuitamente en http://www.apta.org.es y http://catedracero.ee.upm.es

Serie: **PRÁCTICA EN EL PROYECTO DE ESTRUCTURAS DE ACERO EN EDIFICACIÓN**
Series on: ***DESIGN OF BUILDING STEEL STRUCTURES:***
DBSS

Coordinador: Prof. Dr. Arch. JAIME CERVERA
CatedrAcero, **ETSAM, UPM**

Editor

Manual: **UNIONES ATORNILLADAS FRONTALES**
Handbook: ***FRONTAL BOLTED JOINTS:***
FB

Autores: Prof. Dr. Eng. JESÚS ORTIZ
HCA y Dp. Estr. Edif., **ETSAM, UPM**
Authors: Dr. Arch. JOSÉ I. HERNANDO
Dp. Estr. Edif., **ETSAM, UPM**
Prof. Dr. Arch. JAIME CERVERA
Dp. Estr. Edif., **ETSAM, UPM**

Colaborador: Antonio Aznar López

Normativa nacional: CTE DB SE-A M.Vivienda, Spain 2006,
EAE, Documento 1, M.Fomento, Spain, 2006

European Codes: EUROCODE 3, DESIGN OF STEEL STRUCTURES:
EN 1993-1-1:2005; EN 1993-1-8:2005

Software abierto y gratuito en
Open software

http://catedracero.ee.upm.es

Patrocinador:
Sponsor:

www.apta.org.es

Desarrollado en:
Developed in:

www.upm.es

catedracero.ee.upm.es

INDICE

1 GENERALIDADES

1.1 GLOSARIO

A	área bruta de la sección transversal del tornillo
A_{eff}	área reducida de la sección transversal
A_f	área de un ala
A_s	área resistente a tracción del tornillo o perno de anclaje
A_v	área a cortante
A_w	área del alma
b	ancho de una sección transversal
χ	coeficiente de reducción por pandeo
d	diámetro nominal del tornillo
d_0	diámetro del agujero
ε	deformación
E	módulo de elasticidad
e_1	distancia desde el centro del agujero hasta el extremo adyacente medido en la dirección de transferencia de la carga
e_2	distancia desde el centro del agujero del elemento hasta el borde adyacente medido en ángulos rectos respecto a la dirección de transferencia de la carga
ELS	estado límite de servicio
ELU	estado límite último
$F_{b,Rd}$	resistencia a aplastamiento de cálculo por tornillo
$F_{p,C}$	esfuerzo de pretensado
$F_{p,Cd}$	esfuerzo de pretensado de cálculo
$F_{s,Rd}$	resistencia al deslizamiento de cálculo por tornillo en el ELU
$F_{s,Rd,ser}$	resistencia al deslizamiento de cálculo por tornillo en el ELS
$F_{t,Ed}$	solicitación a tracción de cálculo por tornillo para el estado límite último
$F_{t,Rd}$	resistencia a tracción de cálculo por tornillo
$F_{T,Rd}$	resistencia a tracción del casquillo en T equivalente

f_u	resistencia última
$F_{v,Ed}$	resistencia a cortante de cálculo por tornillo en ELU
$F_{v,Ed,ser}$	resistencia a cortante de cálculo por tornillo en el ELS
$F_{v,Rd}$	resistencia a cortante de cálculo por tornillo
f_y	límite elástico
G_k	valor característico de las cargas permanentes
γ_M	coeficiente parcial
h	canto de una sección transversal
I	momento de inercia de la sección transversal
k_1	coeficiente definido en la tabla 3.4 para cálculo de $F_{b,Rd}$
M_{Ed}	momento flector de cálculo
M_{Rd}	Valor de cálculo de la resistencia al momento flector
$M_{y,Ed}$	momento flector de cálculo, eje y-y
$M_{y,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia al momento flector, eje y-y
ν	coeficiente de Poisson en rango elástica
n	número de superficies de rozamiento; número de agujeros
N_{Ed}	esfuerzo normal de cálculo
$N_{pl,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia plástica a tracción de la sección transversal bruta
N_{Rd}	valor de calculo de la resistencia al esfuerzo normal
$N_{u,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia última a tracción de la sección transversal neta, considerando los agujeros para los elementos de unión
μ	coeficiente de rozamiento
p	distancia entre centros de los agujeros consecutivos
p_1	distancia entre los centros de los agujeros según la dirección de la transmisión de carga
p_2	distancia entre filas adyacentes de agujeros medida en dirección perpendicular a la de transmisión de la carga
Q	fuerza de palanca
Q_k	valor característico de las cargas variables
ρ	coeficiente de reducción para determinar la resistencia de los

	momentos flectores reducidos por la presencia de esfuerzos cortantes
R_d	valor de cálculo de resistencia
σ	tensión
t_f	espesor del ala
t_p	espesor de una placa
t_w	espesor del alma
V_{Ed}	valor de cálculo del esfuerzo cortante
$V_{pl,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia plástica a cortante
$V_{wp,Rd}$	es la resistencia plástica a cortante del alma de un pilar
W_{pl}	módulo resistente plástico de la sección
x-x	Eje longitudinal de un elemento
y-y	Eje de una sección transversal
z	brazo de palanca
z-z	Eje de una sección transversal
α	coeficiente definido en la tabla 3.4 para cálculo de $F_{b,Rd}$
χ	coeficiente reductor para la curva de pandeo considerada
$\bar{\lambda}$	esbeltez reducida

1.2 CLASIFICACIÓN Y CODIFICACIÓN GENERAL DE UNIONES DE LAS ESTRUCTURAS DE ACERO EN EDIFICACIÓN.

No resulta sencillo establecer una clasificación general de un ámbito tan amplio como es el de las uniones de acero en edificación. Sin embargo dicho objetivo tiene el interés de facilitar la comunicación relativa a éstas, lo que entre otras cosas hará posible la automatización de su análisis y comprobación, al establecer de forma inequívoca las posiciones, geometrías y esfuerzos implicados en la unión.

La clasificación podría hacerse desde diversas perspectivas: caracterizando la posición ocupada en algunos de los elementos estándares de los tipos estructurales habituales en edificación, o caracterizando más bien cualidades genéricas –geométricas y mecánicas- de la unión.

La codificación planteada, aunque parcial, trata de identificar unívocamente la unión seleccionada desde esta última perspectiva.

Las características que han de considerarse en cualquier definición, desde la perspectiva de cada *miembro* de la unión han de responder a las cuestiones siguientes:

Orden	***Cualidad***	***Algunas alternativas***
1	Jerarquía	Numeración del orden ocupado en el montaje
2	Geometría general	En continuidad o prolongación, desvío de dirección, acometida (T)
3	Posición (y geometría) de los elementos de fijación	Frontal, lateral, mixto
4	Tipo de enlace	Adosado, atornillado, soldado, híbrido
5	Capacidad resistente relativa a la del perfil	Sobreabundante (120%), completa (100%), parcial (% en ocasiones)
6	Rigidez rotacional relativa (al miembro)	Total, parcial (%), articulación.

Hay que tener en cuenta que las dos últimas cualidades –resistencia y rigidez relativa- lo son en relación a las del perfil (sección) y pieza (sección y longitud), por lo que son de definición problemática.

Por dar un ejemplo sencillo, una prolongación de soporte será en la mayoría de los casos una unión Primaria, en Continuidad, de tipo Frontal Atornillado, de capacidad Completa, y rigidez Total.

La unión completa integrará el conjunto de definiciones correspondientes a todos los *miembros* que la constituyen.

Ahora bien, dado que en general una unión materializa el enlace entre el extremo de una pieza –o *miembro* de la unión- y el resto de la edificación no siempre es necesario/posible precisar todos los aspectos considerados, y la definición puede hacerse considerando sólo parte. Por ejemplo, las uniones de extremo de viga atornilladas que se realizan mediante el recurso a una chapa frontal serán en general uniones secundarias a la de continuidad del soporte, (que tal vez requiera de refuerzo de alma por cortante de nudo, etc.) y las capacidades relativas en resistencia y rigidez (en general parciales) pueden considerarse como una consecuencia del diseño realizado, por lo que basta la caracterización de la geometría empleada.

En esta primera aproximación se emplean nomenclaturas derivadas de las iniciales en inglés de los términos adecuados, de modo que una denominación tiene el formato general

[P|S|T] [C|D|A] (F|L|M) [n] (B|W) [(S|F|R|N) [n] [F|R|N] [n] [C]]

() es una agrupación.
| establece alternativas en ese grupo.
[] establece un elemento opcional que puede especificarse o no.
n es un número, a veces expresa opción, otras porcentaje.

y las iniciales lo son de

Primary, Secondary, Tertiary
Continuity, Deviation, to Attack
Frontal, Lateral, Mixed
Bolted, Welded
Superabundant, Full, Reduced, Null
Composite

CF00BC (en capítulo 5) es por tanto una unión en Continuidad, de enlace Frontal, atornillada mixta

1.3 ACCESO AL SOFTWARE PROPIEDAD DE CATEDRACERO, DE CÓDIGO ABIERTO, CON CARÁCTER GRATUITO Y EDUCACIONAL, SIN ASUNCIÓN DE RESPONSIBILIDAD EN CASO DE SU USO PARA PRESTACIÓN DE SERVICIOS PROFESIONALES A TERCEROS O DE OTRA ÍNDOLE.

CátedrAcero promueve la divulgación de conocimientos y herramientas apropiadas para el proyecto de estructuras o elementos estructurales de acero en edificación. Dichas herramientas, disponibles en la dirección de Internet **http://catedracero.ee.upm.es**, tienen vocación de extenderse y proliferar, para lo que se distribuyen bajo la Licencia *Reconocimiento-CompartirIgual 2.5 Spain License de Creative Commons.* La licencia es visitable en: *http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/es/,* su código legal está definido en detalle en *http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/es/legalcode.es* y su representación simbólica, empleada en la primera página de este texto así como en la páginas de Internet precisas, es la siguiente:

Dicha licencia reconoce la autoría y la propiedad intelectual sobre el material disponible y establece las naturales limitaciones y exoneraciones de responsabilidad por cualesquiera daños que pudiesen resultar del uso del material distribuído, tanto si se producen por errores en dicho material como si lo son por su empleo incorrecto. La licencia permite al licenciatario el empleo gratuíto del material distribuído, y su incorporación a todo tipo de material derivado, con restricciones. Se establece la obligación al licenciatario a reconocer la autoría original en cualquier tipo de material derivado, lo que incluye la referencia tanto a los autores como a la página de difusión de CátedrAcero en Internet. La licencia incluye igualmente la obligación de distribuir cualquier material derivado de éste con una licencia idéntica a la del material original, lo que asegura la futura libre divulgación de dicho material derivado.

La licencia, sin embargo, no restringe el posible uso comercial de ningún tipo de material, sea original o derivado, de los que (o con los que) podrían obtenerse rendimientos económicos en la medida en que se aporte algún tipo de valor o servicio añadido, dado el carácter gratuito del material original.

La filosofía del *copyleft*, frente a la del *copyright*, que está detrás de esta decisión se sitúa en línea con la tradición científica occidental de divulgar y compartir los conocimientos, sin la que el progreso de Occidente no habría sido posible. En la medida en que el conocimiento compartido no reduce el del autor, e incrementa el del receptor, dicha estrategia tiene un mayor potencial de progreso y difusión que la estrategia opuesta y es, por tanto, la adoptada para la divulgación del material de apoyo producido, en aras de su máxima difusión posible. Se trata de asegurar que el empleo del acero en edificación no se vea restringido por razones de dificultad o limitación técnica, ni tampoco por "software cerrado" y de acceso restringido, de la misma manera que los productos siderúrgicos se fabrican en régimen de industrialización "abierta", sin diseños amparados por patentes.

La licencia permite por tanto el empleo educacional del material publicado, y su incorporación en trabajos posteriores, y permite su uso para servicios profesionales a terceros, pero sin asunción de responsabilidad de ningún tipo, que debe ser asumida totalmente por los profesionales que ejecutan dichos servicios.

En este último contexto cabe manifestar la oposición de los redactores de este manual a la mala práctica que supone el empleo de herramientas informáticas avanzadas de análisis o proyecto estructural por profesionales de insuficiente formación en el ámbito de aplicación de dichas herramientas, fiando, irresponsablemente, en la *bondad* de éstas, o en el conocimiento atribuído a sus creadores, y abdicando, al menos parcialmente, en su responsabilidad sobre los proyectos realizados: se trata de una actitud que a medio plazo generalizaría la irresponsabilidad colectiva sobre la edificación: los creadores de herramientas porque no pueden controlar ni la calidad del conocimiento de sus usuarios ni las repercusiones de ésta en el cada vez más extenso campo de aplicación de las herramientas, y los usuarios por las falsas razones ya señaladas. La licencia con que se distribuye este material de apoyo establece con absoluta claridad que la totalidad de la responsabilidad sobre las soluciones adoptadas corresponde al profesional que las adopta sin posible repercusión ni a las herramientas que emplea para ello, ni a sus creadores

1.4 CAPACIDADES MECÁNICAS Y LIMITACIONES GEOMÉTRICAS DE LOS TORNILLOS DE ALTA RESISTENCIA, PRETENSADOS (TR).

La gama de tornillos adoptada es la de nomenclatura A10.9 según la tabla 3.1 de EN 1993-1-8:2005 y la 4.3 del CTE DB SE-A, con límite elástico 900 N/mm^2 y resistencia última a la tracción 1000 N/mm^2. Corresponden a los descritos en la siguiente figura de la norma DIN 7999, del tipo "high strength close-tolerance":

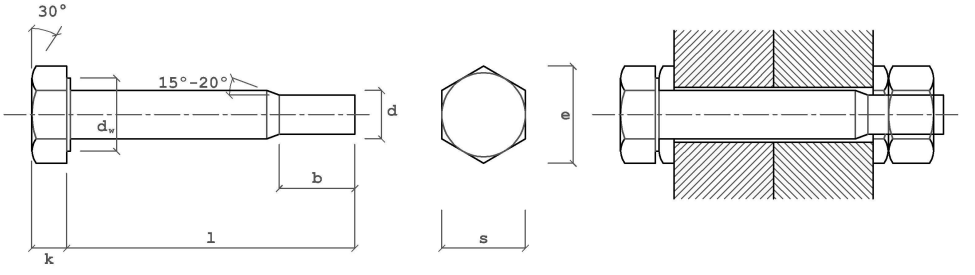


figura 1: TR

Las características de las diferentes métricas se definen en la siguiente tabla (en los ejemplos se ha descartado el M30, de uso menos común):

Tabla 1: Métrica y geometría de los TR

		M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30
Diámetro nominal	d	12	16	20	22	24	27	30
Area bruta	A	113	201	314	380	452	573	707
Area resistente	As	84.3	157	245	303	353	459	561
Distancia entre aristas	c_{min}	22.78	29.59	37.29	39.55	45.2	50.85	55.37
Grosor de la cabeza	k	8	10	13	14	15	17	19
Paso	p	1.75	2	2.5	2.5	3	3	3.5
Diámetro del agujero prEN 1090:2006-10	d_0	13	18	22	24	26	30	33

Las separaciones (p) y distancias a bordes interiores (m) y exteriores (e) mínimas se definen a continuación

Tabla 2: Mínimos según tabla 3.3 de EN 1993-1-8:2005

	M12	M16	M20	M22	M24	M27	Observaciones
p_1	29	40	49	53	58	66	2.2 d_0
p_2	32	44	53	58	63	72	2.4 d_0
e (ext.)	16	22	27	29	32	36	1.2 d_0

Tabla 3: Mínimos típicos por maquinaria de apriete, según accesibilidad (valores estimados orientativos).

	M12	M16	M20	M22	M24	M27	Observaciones
P	35	43	47	53	57	65	Variables s. utillaje.
m (int.) ≈	30-40	30-40	35-40	40-50	40-50	45-60	≈ máx(2d, 35) ± 5

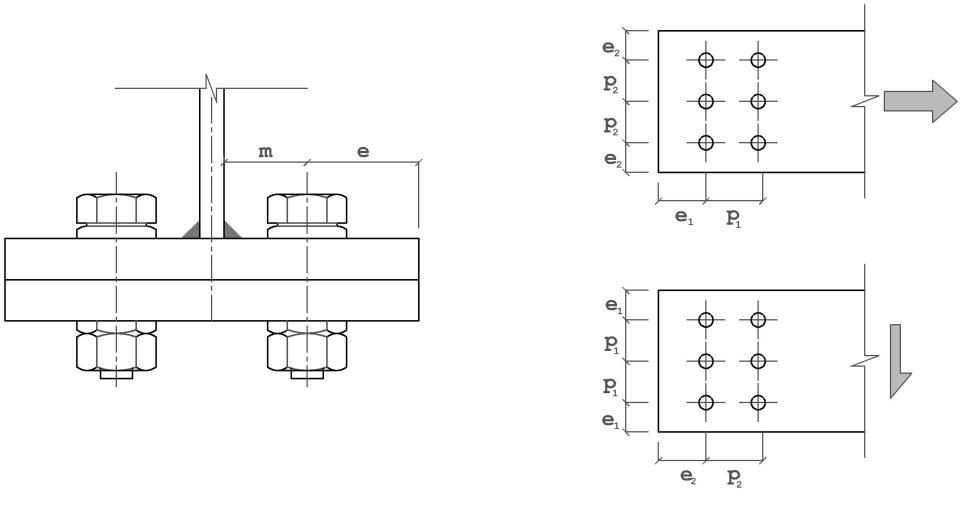


figura 2: separación (p), distancia al borde interior(m) y exterior (e)

En las siguientes tablas se calculan las resistencias de cada uno de los tornillos previamente definidos (salvo fallo del resto de elementos de la unión por flexión local, aplastamiento, desgarro, etc.). Las expresiones utilizadas se han tomado de EN 1993-1-8 tabla 3.4 y artículo 3.9.1:

$F_{t,Rd} = 0.9 \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{M2}$

$F_{v,Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot A / \gamma_{M2}$

$F_{s,Rd,ser} = \mu \cdot F_{p,C} / \gamma_{M3}$; $F_{p,C} = 0.7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$

Los valores de A y A_s están tomados de la tabla 1

Tabla 4: Resistencia de cada tornillo (cálculos)

M12:	$F_{t,Rd}$	0.9·84.3·1000/1.25 N	60.7 kN
	$F_{v,Rd}$	0.6·113·1000/1.25 N	54.2 kN
	$F_{s,Rd,ser}$	0.5·0.7·84.3·1000/1.1 N	26.8 kN
M16:	$F_{t,Rd}$	0.9·157·1000/1.25 N	113 kN
	$F_{v,Rd}$	0.6·201·1000/1.25 N	96.5 kN
	$F_{s,Rd,ser}$	0.5·0.7·157·1000/1.1 N	50 kN
M20:	$F_{t,Rd}$	0.9·245·1000/1.25 N	176 kN
	$F_{v,Rd}$	0.6·314·1000/1.25 N	151 kN
	$F_{s,Rd,ser}$	0.5·0.7·245·1000/1.1 N	78 kN
M22:	$F_{t,Rd}$	0.9·303·1000/1.25 N	218 kN
	$F_{v,Rd}$	0.6·380·1000/1.25 N	182 kN
	$F_{s,Rd,ser}$	0.5·0.7·303·1000/1.1 N	96.4 kN
M24:	$F_{t,Rd}$	0.9·353·1000/1.25 N	254 kN
	$F_{v,Rd}$	0.6·452·1000/1.25 N	217 kN
	$F_{s,Rd,ser}$	0.5·0.7·353·1000/1.1 N	112 kN
M27:	$F_{t,Rd}$	0.9·459·1000/1.25 N	330 kN
	$F_{v,Rd}$	0.6·573·1000/1.25 N	275 kN
	$F_{s,Rd,ser}$	0.5·0.7·459·1000/1.1 N	146 kN

Tabla 5: Resistencia de cada tornillo (tabla resumen)

	M12	M16	M20	M22	M24	M27	Observaciones
							Categoría B
$F_{t,Rd}$ (kN)	60.7	113	176	218	254	328	ELU, tracción
$F_{v,Rd}$ (kN)	54	96.5	151	182	217	274	ELU, cortante
$F_{s,Rd,ser}$ (kN)	26.8	50	78	96.4	112	145	ELS, cortante

Material: A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1)

Superficies preparadas y/o tratadas para $\mu \geq 0.5$
(EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7,
prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejoG)

Apretadura**:** El par de apriete según CTE, EAE o prEN 1090-2:2006-10 (y antigua EA95) para tornillos de alta resistencia tiene mero valor orientativo, para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento empleado

Tabla 6: Resistencia de TR solicitados simultáneamente a tracción y cortante

EC3 y CTE		EAE	
$F_{v,Ed}/F_{v,Rd} + F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd} \leq 1$		$(F_{v,Ed}/F_{v,Rd})^2 + (F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd})^2 \leq 1$	
$F_{v,Ed}/F_{v,Rd}$	$F_{t,Ed}/F_{t,Rd}$	$F_{v,Ed}/F_{v,Rd}$	$F_{t,Ed}/F_{t,Rd}$
0	1	0	1
0.286	1	0.700	1
0.357	0.900	0.766	0.900
0.429	0.800	0.821	0.800
0.500	0.700	0.866	0.700
0.571	0.600	0.904	0.600
0.643	0.500	0.934	0.500
0.714	0.400	0.958	0.400
0.786	0.300	0.977	0.300
0.857	0.200	0.990	0.200
0.929	0.100	0.997	0.100
1	0	1	0

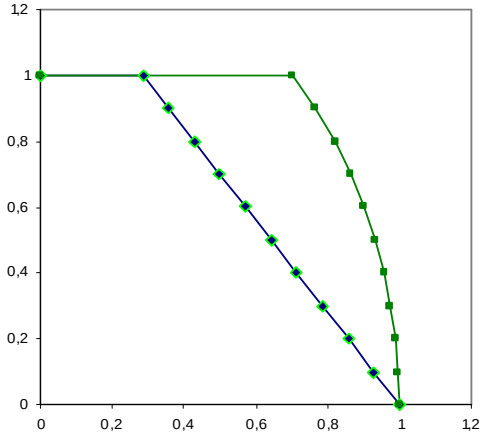


Figura 3: Resistencia de TR solicitados simultáneamente a tracción y cortante (EC3 y CTE –diagrama lineal-, EAE)

Comentarios:

Se han supuesto las siguientes condiciones en las tablas previas: Tornillos no avellanados, por lo que $k_2 = 0.9$ en la expresión de la resistencia a tracción ($F_{t,Rd}$). En el cálculo de $F_{v,Rd}$ (resistencia a cortante) el plano de corte pasa por la parte no roscada del tornillo tomándose entonces $\alpha_v = 0.6$. (según CTE DB SE-A el valor a considerar es 0.5). Finalmente en el cálculo de $F_{s,Rd,ser}$ se ha supuesto un plano de corte y agujeros normales ($n = 1$ y $k_s = 1$). El valor del coeficiente de rozamiento considerado en la resistencia a deslizamiento en ELS ($F_{s,Rd,ser}$) se discute con detalle en los parrafos que siguen.

Para estructuras de edificación se ha supuesto como "normal" para las uniones atornilladas la categoría B definida por el Eurocódigo 3, para la cual la ausencia de deslizamientos y/o descompresiones de la unión se exige sólo en el estado de servicio. Se trata del tipo adoptado de forma general en CTE-DB-SEA.

La calidad del material del tornillo y las condiciones de preparación de superficies supuestas son las máximas estipuladas por dichos códigos. El coeficiente de rozamiento especificado ($\mu \geq 0.5$) se puede garantizar por uno de los tres procedimientos señalados a continuación: 1) chorreado o granallado al grado Sa 2 ½, sin picaduras de corrosión; 2) chorreado o granallado al grado Sa 2 ½ y metalizado por pulverización con aluminio; 3) chorreado o granallado metalizados por pulverización a base de zinc, con ensayo de

deslizamiento. Puede encontrarse información adicional en el apartado 8.4 (tabla 14) de prEN 1090-2:2006-10 y en su anejo G, donde se especifica el procedimiento para determinar, mediante ensayo, el coeficiente de rozamiento de cualquier superficie.

En caso de especificarse condiciones menos exigentes, los valores de $F_{t,Rd}$ y $F_{v,Rd}$ deben disminuirse proporcionalmente a la resistencia del acero del tornillo, y/o $F_{s,Rd,ser}$ debe reducirse según el coeficiente de rozamiento especificado en el Proyecto.

El procedimiento de apriete debe garantizar un esfuerzo de pretensado en el tornillo ($F_{p,C}$) correspondiente al 70 % de su resistencia a la tracción, tal como se aprecia en los cálculos anteriores, salvo coeficientes parciales de seguridad de la unión (γ_{M2} = 1.25 en ELU y γ_{M3} = 1.1 en ELS). El control mediante llave dinamométrica del par torsor $M_t = 0.18 \cdot d \cdot F_{p,C}$ (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo, para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico debe aportar certificación de la homologación del procedimiento empleado (ensayo según prUNE-EN 14392 o prEN 1090-2:2006-10 anejo O) y debe controlarse expresamente el estado de suministro real de los tornillos respecto del supuesto en los ensayos.

Especialmente clarificador a este respecto resulta el trabajo recientemente publicado por S.Pérez-Fadón, J.E.Herrero, et al. (Hormigón y Acero, nº 236, 2005), del que se toman las figuras adjuntas, en cuya parte inferior se incluyen diferentes tipos de lubricantes ensayados: a) cera petrolífera; b) grasa petrolífera con adición de grafito de consistencia líquida; c) lubricante de bisulfuro de molibdeno; d) pasta de bisulfuro de molibdeno, de los cuales los autores citados recomiendan este último. En los ensayos realizados han medido con célula de carga las fuerzas de pretensado reales en el tornillo: el histograma de frecuencias porcentuales muestra la amplia dispersión de valores, incluso con el lubricante recomendado y bajo condiciones de laboratorio, lo que justifica la aplicación en los cálculos de un coeficiente parcial de seguridad $\gamma_M > 1$ también para los E.L.S. Pero especialmente clarificadora resulta la verificación de que el par de apriete experimentalmente evaluado para conseguir la fuerza de pretensado ($F_{p,C}$) deseada, con esas condiciones idóneas de lubricación es aproximadamente un 30 % menor que el par torsor teórico $M_t = 0.18 \cdot d \cdot F_{p,C}$ (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95), mientras que, en ausencia de lubricación, incluso con un exceso del orden del 15 % sobre dicho par teórico, el valor real

de $F_{p,C}$ apenas alcanza el 60 % de su valor nominal.

figura 4: S.Pérez-Fadón, J.E.Herrero, et al. (Hormigón y Acero, nº 236, 2005)

Por lo tanto la homologación del procedimiento y su control expreso en obra son indispensables tanto para evitar roturas de tornillos por posibles aprietes inadecuados, como para garantizar las fuerzas de pretensado teóricas cuando su valor resulte crítico en el cálculo de la unión.

En la tabla 6 y la figura 3 se comparan los diagramas de interacción para tornillos solicitados simultameamente a tracción y cortante propuestos por EN 1993-1-8:2005 y CTE DB SE-A por un lado y EAE por otro. En los apartados siguientes siempre se tomará la expresión de la tabla 3.4 de EN 1993-1-8:2005.

2 UNIONES ATORNILLADAS.

En este capítulo se describen varios aspectos comunes a las uniones que se desarrollan en los siguientes. Su propósito principal es evitar la repetición de conceptos y facilitar el uso del texto: en caso de interesar el estudio de la unión del último capítulo (F20B) bastaría leer aquél y éste, sin necesidad de buscar ideas expuestas en otros capítulos intermedios. El resto de los capítulos del texto, junto con éste, tienen los mismos apartados por lo que la relación entre ellos es inmediata aunque su título varía ligeramente en el actual.

2.1 DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN DE LAS UNIONES ESTUDIADAS.

Debe resaltarse que los diseños propuestos, así como los cálculos, corresponden a uniones de proyectos reales. Las únicas modificaciones introducidas en los mismos son las necesarias para ajustarlos a la última versión de EN 1993 de la que han dispuesto los autores (ver la bibliografía).

Las uniones analizadas en los siguientes capítulos se clasifican, atendiendo a sus solicitaciones, en dos grupos:

- Uniones en las que la solicitación predominante es la flexión. Las cuales a su vez se dividen, de acuerdo con la tipología de la estructura a la cual pertenecen, en:
    - Uniones de estructuras metálicas puras (capítulos 3 y 4).
    - Uniones de estructuras mixtas (capítulo 5).
- Uniones en las cuales predomina el esfuerzo de tracción (capítulos 6 y 7).

Características comunes a los cinco diseños propuestos en el texto, y a los que se incluyen en los “libros de cálculo”, son su gran capacidad, fiabilidad, rapidez y economía, difíciles de conseguir incluso mediante otras uniones atornilladas “in situ”:

- Su capacidad es suficiente para ubicar las uniones que se proponen en las secciones más solicitadas de las piezas. Las de los dos últimos capítulos en las secciones extremas de vigas trianguladas de gran luz y las de los primeros capítulos pueden llegar a materializar la unión de una viga mixta, la cual en la fase de proyecto inicial hace frente a todas las solicitaciones del proceso constructivo sin apeos como una estructura metálica “pura”.

- A la fiabilidad que ya tienen de por si todas la uniones atornilladas cabe añadir que, como en esta tipología no suele ser condicionante la comprobación de deslizamiento en ELS, las problemáticas condiciones del coeficiente de rozamiento μ de las superficies de contacto pueden relajarse (salvo en las uniones con tracciones muy fuertes como las de los últimos capítulos), en cuyo caso se podrán relajar los criterios de aceptación o rechazo de los coeficientes de rozamiento de las superficies en contacto (EAE, M.F. 2006: 58.7; CTE DB SE-A, M.V. 2006: 7.3.2; EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7 y prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14). Las problemáticas especificaciones sobre el procedimiento de apriete de los tornillos no lo serán tanto en este tipo de unión.
- En estas uniones se minimiza el número de tornillos y taladros frente a otras uniones como las laterales con cubrejuntas. También se minimiza el uso de mano de obra especializada a cambio de adoptar espesores de chapa generosos con los que se evitan cartelas y otros refuerzos. Todo lo anterior redunda en la rapidez de ejecución y la reducción del coste de la estructura, si bien en contrapartida se hacen obligadas por un lado la inspección ultrasónica especifica para las chapas de grueso calibre y por otro la preparación de bordes para evitar el riesgo de desgarro laminar en algunas uniones soldadas que se indicarán.

2.2 EJEMPLOS NUMÉRICOS.

En el apartado número 2 de los capítulos que siguen se desarrollan los cálculos necesarios para comprobar cada unión, constituyendo, por tanto, el núcleo de los mismos. El estudio de una unión metálica cabe interpretarlo como el de una cadena en la que hay que verificar cada uno de sus eslabones o componentes (básicas). De este modo se entiende la tabla 6.1 (y los artículos posteriores) de EN 1993-1-8:2005 donde se enumeran cada una de las “componentes básicas” de una unión entre una viga y un pilar: Resistencia a cortante de alma del pilar, resistencia a compresión del alma del pilar, resistencia a tracción del alma del pilar, resistencia a flexión de las alas del pilar, resistencia a flexión de la chapa frontal, resistencia a compresión del ala y alma de la viga, etc.

Es obvio que la ausencia o el fallo de un eslabón o componente básico de la cadena invalida todo el sistema. Las uniones que se estudian siempre cabría interpretarlas de modo restrictivo como las propuestas en EN 1993-1-

8:2005 6.2.7.2 (10), si bien se pueden utilizar en cualquier diseño que garantice la existencia y resistencia de los eslabones de la cadena en la mitad de la unión no incluida en los cálculos: En las uniones que se estudian en los próximos capítulos se asume implícitamente que todo elemento tiene su "contrapartida" en el otro lado de la unión.

La estructura del apartado 2 de todos los capítulos que siguen es común para todos ellos, salvo pequeñas diferencias marginales. Dicha estructura está recogida en la siguiente tabla, en la cual se mantiene el tipo de letra correspondiente a las distintas secciones y subsecciones del apartado con objeto de poder identificarlas rápidamente.

Estructura del apartado 2 de los siguientes capítulos

Capítulos 3, 4 y 5	***Capítulos 6 y 7***
F**B	***F**B***
Capacidad resistente del perfil base	***Solicitaciones nominales de la unión***
Solicitaciones nominales de la unión	***Comprobación del perfil base***
	Dimensiones eficaces:
	Resistencia del perfil base
	Resistencia de la sección reforzada
ELU según EN 1993-1-8:2005	***ELU según EN 1993-1-8:2005***
Conjunto de la unión	Conjunto de la unión
Chapa frontal	Chapa frontal
ELS (categoría B) según EN1993-1-8:2005	***ELS (categoría B) según EN1993-1-8:2005***
	Solicitaciones de la unión respecto del CDG del conjunto de TR
Descompresión	Descompresión
Rozamiento	Rozamiento

El título de la primera sección de este apartado se ajusta a la codificación de la unión propuesta en el apartado 1.2, a la que se añade el tipo y calibre del perfil base junto con la clase del acero y, opcionalmente, alguna característica adicional relevante de la unión. En dicha sección se describe cada unión a través de un cuadro autocontenido, de manera que puede transcribirse inmediatamente a los planos y/o al resto de documentación de proyecto. En el cuadro se sintetizan, por tanto, los datos básicos de cada unión. En los capítulos 3, 4 y 5 se incorpora el cuadro de dos uniones: la primera corresponde a una unión en continuidad y la segunda a un nudo extremo, si bien en los cálculos numéricos sólo se desarrolla la primera. El cuadro tiene siempre la siguiente estructura con retoques menores.

TORNILLOS			
A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1) Superficies preparadas y/o tratadas para $\mu \geq 0.5$ (EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejoG)			
El par de apriete para tornillos de alta resistencia (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento.			
Valores característicos (N/mm^2)		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 1000$	$f_{yb} = 900$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1.25$

Definición de la Unión: **F[n]B [IPE|HE]nnn[ABM] (S[275|355][JR|J2G3])**			
Chapa frontal S[275|355][JR|J2G3] Control ultrasónico específico según UNE 36100 y 7278 al grado B			Calzo/forro para tolerancia S[275|355]
# b·h·t Soldaduras de alas ◢◣ a_f Soldaduras de alma ◢◣ a_w			$g \leq 15$ mm.
Tornillos superiores		**Tornillos inferiores**	
Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)	Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)

El significado de los símbolos [] y el de | es el dado en la sección 1.2. En el cuadro se incluyen los datos geométricos que permiten definir la unión y

también las propiedades de los materiales de la unión, de forma que si se incorpora el cuadro en los planos del proyecto la unión quede definida de forma autocontenida. Como se indicó en 1.4 en todas las uniones se ha optado por utilizar los tornillos de la máxima categoría de los contemplados en la tabla 3.1 de EN 1993-1-8:2005 (en realidad sólo puede optarse por esta clase y la 8.8 si las uniones son de categoría B según EN 1993-1-8:2005 tabla 3.2 o artículo 3.9.1) y el coeficiente de rozamiento en todas las uniones estudiadas es el máximo posible según EN 1993-1-8:2005 (tabla 3.7). En el citado apartado 1.4 se han indicado los procedimientos para garantizar este valor de μ, y en él se justifican las razones para reiterar en todos los documentos del proyecto las referencias al procedimiento de pretensado. En 2.1 se indicaron las razones por las que la chapa frontal de estas uniones suele ser de espesores muy generosos y la necesidad por tanto de un control especifico, que igual que el procedimiento de pretensado se estima conveniente incluirlo en todos los documentos del proyecto. Asimismo se incluye en el cuadro el espesor máximo de los calzos o forros para tolerancia (g) para los cuales la unión está comprobada. El valor estimado para todas las uniones de esta guía es de 15mm. Los valores estándar en estructuras metálicas de edificación son del orden de los 10mm, valores que deberán asumirse, aumentarse o disminuirse según los criterios del proyectista. Las últimas celdas de la tabla se destinan a indicar el número de filas, tornillos de cada una, calibre de los mismos y diversas distancias que definen unívocamente cada unión particular.

Capacidad resistente del perfil base. Comprobación del perfil base. Solicitaciones (nominales) de la unión.

Caracterizada la unión, en las dos siguientes secciones de este apartado se determinan las solicitaciones para las que se desarrollarán los cálculos de la unión y se comprueba el perfil de la misma. Para obtener las solicitaciones se han seguido los dos métodos propuestos en EN 1993-1-1:2005: Diseño en capacidad (1.5.8) o un análisis global estándar (5.2). Dependiendo del método seguido para obtener las solicitaciones el orden de estas dos secciones se invierte. En los capítulos 3, 4 y 5 se optó por el diseño en capacidad en el cual se parte no de los esfuerzos obtenidos en un análisis global sino de los máximos que pueden ser transmitidos desde elementos contiguos. Así se justifica que antes de indicar los valores de cálculo de la unión se evalúen los del diagrama de interacción M/V del perfil base. El estudio de la unión se concluye una vez verificado que el diagrama de interacción de la unión incluye al de la sección base. En la práctica habitual se verificarán sólo algunos puntos del diagrama, si bien en los capítulos siguientes el estudio se reducirá al punto

del diagrama que se considera más significativo.

Las solicitaciones con las que se estudian las uniones de los capítulos 6 y 7 se toman de un “análisis global” estándar de la estructura. En estos dos capítulos la comprobación del perfil es obviamente posterior a la obtención de las solicitaciones. En las uniones que se analizan junto a un esfuerzo axil predominante actúan un momento flector y un esfuerzo cortante, por lo cual la verificación del perfil se hace de acuerdo con EN 1993-1-1:2005 6.2.10 y una fórmula de interacción N-M-V independiente a la anterior tomada del Anejo A3.3 de “Estructuras de edificación: análisis lineal y no lineal”, Ariel, 2002 (al final de este capítulo se justifica este diagrama de interacción). En ambas uniones el perfil está reforzado en la sección inmediata a la chapa frontal, por lo que la comprobación se realiza para la sección del perfil base y para la sección reforzada. Las uniones que se analizan en estos dos capítulos corresponden al extremo de sendas vigas trianguladas, por lo que al perfil de su cordón se suelda la última diagonal de la viga. A la comprobación del perfil base debe añadirse la de su alma en tracción transversal y su ala en flexión según EN 1993-1-8:2005 6.2.6.3 y 4.10 respectivamente (ligeramente modificadas para tener en cuenta el ángulo de la diagonal). Esto se hace en la subsección “Dimensiones eficaces”.

En los capítulos 6 y 7 las solicitaciones de servicio se pueden obtener del mismo análisis global antedicho, mientras que para las uniones calculadas por “capacidad” deben determinarse dividiendo las solicitaciones de cálculo para un valor γ_f promedio entre 1.5 y 1.35. Dicho valor promedio depende de la relación entre las distintas categorías de las acciones de cada proyecto. Un valor típico en edificación es 1.41. Los propuestos en los cálculos que siguen se ajustan a los del proyecto real al que corresponde cada una de las uniones.

ELU según EN 1993-1-8:2005

En esta sección y en la siguiente de cada uno de los próximos capítulos se realiza propiamente la comprobación de la unión atornillada correspondiente.

Los cálculos se plantean en forma de "comprobación", no de "dimensionado". En la práctica del proyecto este planteamiento es útil si se parte de un dimensionado estimado a priori, próximo al dimensionado final (por consideraciones semiempíricas, tales como ubicar el conjunto de tornillos con su CDG próximo a la posición de la resultante del conjunto de solicitaciones, y dotándoles de una capacidad mecánica global ligeramente superior a la resultante antedicha) y el "ajuste fino" se realiza por "prueba y error" con herramientas informáticas apropiadas (por ejemplo, "libros de

cálculo" con las diversas comprobaciones programadas, que agilicen dicha labor que de otro modo puede resultar muy tediosa).

El análisis del ELU se inicia calculando la resistencia a tracción y cortante de cálculo de cada uno de los tornillos ($F_{t,Rd}$ y $F_{v,Rd}$; se supone que los planos de corte no atraviesan la zona roscada) de acuerdo con la tabla 3.4 de EN 1993-1-8:2005, junto con el coeficiente de reducción β_p que EN 1993-1-8:2005 3.6.1 (12) prescribe cuando los tornillos atraviesan forros. Asimismo, se determina la reserva de resistencia a cortante de cada tornillo cuando su solicitación a tracción de cálculo alcanza el valor de su resistencia de cálculo ($F_{t,Ed} = F_{t,Rd}$) de acuerdo don la fórmula de interacción propuesta en la tabla 3.4 citada ($F_{v,Ed}/F_{v,Rd} + F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd} \leq 1$).

Obtenidos estos valores se inicia la sección "Conjunto de la unión", en la cual se propone simplemente una distribución equilibrada de esfuerzos en los tornillos que además cumple con sus condiciones de resistencia previamente calculadas. Siempre que se cumplan las condiciones de aplicación de la teoría de la plasticidad, aun con la certeza de que la distribución propuesta no es la real, la unión es segura por basarse el procedimiento en el teorema estático. EN 1993-1-8:2005 6.2.7.2 (1) y (10) avala el uso del cálculo plástico en las uniones que se estudian en esta guía (lo que también permite el CTE SE-A 8.3(3), pese a que en 8.8.4(2) propone una distribución de esfuerzos proporcional a la distancia).

La comprobación de la "Chapa frontal"se realiza también de acuerdo con la teoría de la plasticidad. En los capítulos que siguen en este epígrafe se postula un mecanismo de colapso que se comprueba de acuerdo con el método cinemático de la teoría de placas delgadas. No debe olvidarse que cualquier solución encontrada mediante el método antedicho es "insegura" (todo lo contrario que ocurría con comprobación del "conjunto de la unión" basada en el método estático). Corresponde al responsable del cálculo de una unión valorar los mecanismos de colapso que se proponen y asumirlos sólo cuando lo considere oportuno, observación que nunca se enfatizará lo suficiente si se esta diseñando alguna variación de las uniones propuestas no sancionada por la experiencia. En los "libros de cálculo" desarrollados para cada unión se verifican varios mecanismos, a pesar de lo cual no pierde validez la advertencia previa. De la comprobación de la chapa frontal también se resalta que el valor del su límite elástico f_y suele verse reducido según la tabla 3.1 de EN 1993-1-1:2005 debido a su espesor.

El estudio del ELU se finaliza chequeando la resistencia a

aplastamiento de la chapa frontal de acuerdo con la tabla 3.4 de EN 1993-1-8:2005. La comprobación se reduce a verificar que la resistencia a aplastamiento $F_{b,Rd}$ es mayor que la resistencia a cortante del los tornillos $F_{v,Rd}$ (diseño por capacidad). Aunque en los cálculos manuales se toma $k_1 = 2.5$, hipótesis plausible si en el diseño de la unión se satisfacen las distancias mínimas de EN 1993-1-8:2005, en los "libros de cálculo" este valor se ajusta automáticamente. La resistencia a aplastamiento de la chapa es raramente condicionante en las uniones frontales en las cuales, debido a la ausencia de cartelas, la chapa tiene habitualmente espesores sustanciosos.

ELS (categoría B) según EN 1993-1-8:2005

EN 1993-1-8:2005 clasifica las uniones en 5 categorías. Para la categoría B se indica que no deben producirse deslizamientos en el estado límite de servicio.

Se inicia este apartado calculando la fuerza de pretensado de cada tornillo $F_{p,C}$ y su resistencia de cálculo a deslizamiento $F_{s,Rd}$ de acuerdo con EN 1993-1-8:2005 3.9.1 (2) y (1) respectivamente. Comparando estos valores con una estimación de los efectos de las solicitaciones de servicio se comprueba que, por un lado, no se produce la "Descompresión" de la unión y, por otro, que las solicitaciones de servicio no superan el "Rozamiento" de la unión, por lo que en servicio no se producen deslizamientos. En las uniones solicitadas a tracción (las de los dos últimos capítulos), antes de hacer estas dos comprobaciones, es necesario ajustar las solicitaciones de servicio: Se parte de unos valores referidos al eje baricéntrico del perfil base que sólo ocasionalmente coincidirá con el de los tornillos de la unión.

Una "superficie" de interacción N-V-M aproximada para secciones de acero diversas, de clase 1 o 2.

A continuación se obtiene la formula de interacción N-V-M que se utilizará en los capítulos 6 y 7 como alternativa a la propuesta en el artículo 6.2.10 de EN 1993-1-1:2005. Se deduce primero dicha superficie para una sección rectangular, y luego se transforma para poder sustituir los valores de m_N y m_V calculados para una sección cualquiera, en lugar de los $m_N = 1-n^2$ y $m_V = \sqrt{(1-v^2)}$ propios de la sección rectangular.

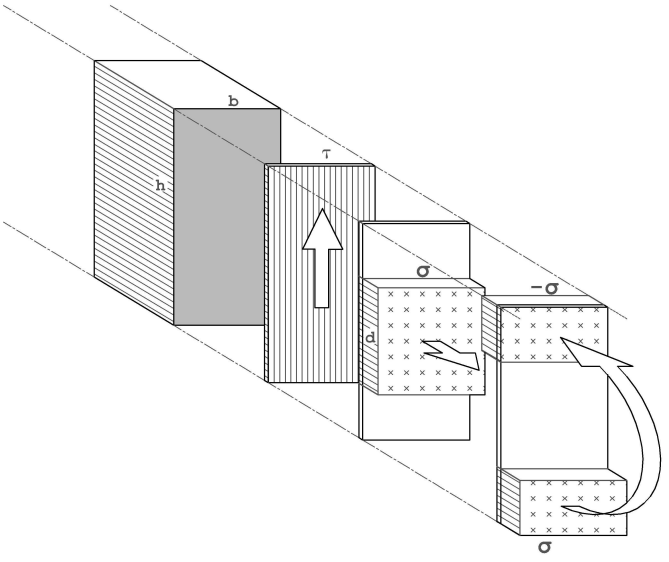


figura 5: Distribución de tensiones en una sección rectangular

$n = N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ $\quad v = V_{Ed}/V_{pl,Rd}$ $\quad m = M_{Ed}/M_{pl,Rd}$

Sección rectangular de acero: $\quad m \leq \sqrt{(1-v^2)} - n^2/\sqrt{(1-v^2)}$

Deducción:

$N_{pl,Rd} = bhf_{yd}$ $\quad V_{pl,Rd} = bhf_{yd}/\sqrt{3}$ $\quad M_{pl,Rd} = (bh^2/4)f_{yd}$

$n = bd\sigma/bhf_{yd} = (d/h)(\sigma/f_{yd})$ $\quad v = bh\tau/(bhf_{yd}/\sqrt{3}) = \tau\sqrt{3}/f_{yd}$

$\sigma^2+3\tau^2 = f_{yd}^2$ $\quad \sigma/f_{yd} = \sqrt{(1-v^2)}$ $\quad d/h = n/\sqrt{(1-v^2)}$

$m = \sigma b[(h-d)/2][(h+d)/2]/[(bh^2/4)f_{yd}] = (1-d^2/h^2)\sqrt{(1-v^2)} = \sqrt{(1-v^2)} - n^2/\sqrt{(1-v^2)}$

Transformación de $m \leq \sqrt{(1-v^2)} - n^2/\sqrt{(1-v^2)}$:

Para $V_{Ed} = 0$ (flexión compuesta) ... $\quad m = m_N = 1 - n^2$

Para $N_{Ed} = 0$ (flexión simple)... $\quad m = m_V = \sqrt{(1-v^2)}$

Sustituyendo $\sqrt{(1-v^2)}$ por m_V y n^2 por $1 - m_N$ en $m \leq \sqrt{(1-v^2)} - n^2/\sqrt{(1-v^2)} = m_V - (1-m_N)/m_V$, se escribe finalmente:

$m \leq m_V-(1-m_N)/m_V$ $\quad$ o bien:

$m+(1-m_V)+(1-m_N)/m_V \leq 1$

Queda claro que para secciones no rectangulares estas expresiones tienen carácter sólo aproximado, aunque mejoran otros criterios "ad hoc" ya mencionados. Además, para aplicar estas expresiones previamente se deben calcular por separado los coeficientes reductores m_N y m_V, mediante la formulación específica de cada tipo de sección, y debe cumplirse $m \leq m_V$ y $m \leq$

m_N (en realidad si uno de ambos límites no se verifica, tampoco se respetaría $m \leq m_V-(1-m_N)/m_V$, según puede deducirse).

Por otra parte, se deben seguir los criterios habituales para la correcta aplicación de los "diagramas de interacción" de esfuerzos simultáneos:

- Las parejas de magnitudes (N_{Ed}, $N_{pl,Rd}$), (V_{Ed}, $V_{pl,Rd}$) y (M_{Ed}, $M_{pl,Rd}$) deben ser de igual signo (entonces obviamente las variables adimensionales n, v y m, son no negativas, por definición).
- No deben aplicarse estos diagramas, que se basan en el teorema estático de la teoría de la plasticidad, a secciones que sean de clase 3 o 4 para las solicitaciones particulares (N_{Ed}, V_{Ed}, M_{Ed}) correspondientes.
- Para secciones de clase 2, dichas solicitaciones no deben incluir redistribuciones anelásticas de sus términos hiperestáticos.
- Para secciones de clase 1 comprimidas, las redistribuciones antedichas sólo son válidas si las esbelteces de las piezas correspondientes se limitan de acuerdo con la antigua UNE-ENV 1993-1-1, AENOR Dic.96, artículo 5.2.7.
- Para todo tipo de secciones, los fenómenos de pandeo de la pieza fuera del plano de la estructura, con o sin torsión, y los fenómenos de pandeo global, etc., deben incluirse en el análisis, o bien coaccionarse mediante arriostramientos apropiados, según los criterios del citado Eurocódigo, que son más exigentes a este respecto si se aplican métodos de cálculo plástico.

2.3 EXPLICACIONES COMUNES PARA TODOS LOS LIBROS DE CÁLCULO DISPONIBLES EN http://catedracero.ee.upm.es.

Como ya se ha indicado los cálculos que se exponen en el apartado 2 de cada capítulo se plantean en forma de "comprobación", no de "dimensionado". Este planteamiento es útil en la práctica del proyecto si se parte de un dimensionado inicial estimado próximo al dimensionado final, y si el "ajuste fino" se realiza rápidamente con ayuda de herramientas informáticas apropiadas.

Para satisfacer la segunda condición se aporta un "libro de cálculo" para cada unión estudiada en los capítulos que siguen. En cada uno de ellos se han programado las diversas comprobaciones necesarias para verificar la unión correspondiente. Los "libro de cálculo” se han desarrollado por CátedAcero en

formato de "código abierto", lo cual permite a quien los utilice examinar las expresiones programadas, asumirlas si lo considera oportuno, o modificarlas según su propio criterio.

Como se indicó en el apartado 1.3 los “libros de cálculo” se distribuyen bajo licencia *Reconocimiento-CompartirIgual 2.5 Spain License de Creative Commons.* Los términos de la licencia y la relación de autores, por orden alfabético, se incluyen en una primera hoja del “libro de cálculo” titulada licencia.

2.3.1 Contenidos

Además de la hoja anterior todos los “libros de cálculo” contienen las siguientes hojas:

> *licencia, PRESENTACION, DATOS, DISTANCIAS, NUDO, Datos_PI, Resul_PI, FB, CHAPA, perfiles, aceros, tornillos, codigos, dxf y dibujo.*

De estas hojas están ocultas las que no se imprimirían en un informe profesional sobre la unión que se estudia (licencia, Datos_PI, Resul_PI, perfiles, aceros, tornillos, codigos, dxf y dibujo). Se ha seguido el criterio de nombrar a las hojas ocultas con letras minúsculas. A continuación se describen brevemente esta primera clase de hojas:

1. Hoja perfiles: incluye una tabla con las constantes estáticas de los perfiles comerciales habituales. Sólo pueden analizarse nudos formados por perfiles incluidos en esta tabla. Para estudiar nudos constituidos por otros perfiles debe accederse a esta tabla (“mostrarla”) e incluir en ella las propiedades de la nueva sección, con la precaución de que los primeros caracteres del campo “id” (columna A) no coincidan con los de otro registro de la tabla, pues de otro modo aparecerá un error al intentar acceder a los datos del nuevo perfil. Para nombrar a los perfiles de las familia HE se ha seguido el criterio que usualmente utilizan los fabricantes en sus catálogos: tras el código HE se añade un número y finalmente una o varias letras que indica la serie: A, B, M, _AA (el carácter ‘_’ es necesario en la serie AA pues de otro modo la hoja de cálculo confunde HE***A con HE***AA, mostrando el error ya comentado).
2. Hoja aceros: Esta hoja incluye una tabla con las propiedades de los aceros junto con diversos coeficientes γ asociados al material. El único dato que se introduce en el uso común de las hojas de cálculo es la

clase del acero, que, obviamente, debe estar descrito en esta hoja. En el fichero FB.xls están definidos los aceros S355, S275 y el A10.9. Para utilizar otro acero simplemente se sustituye uno de los anteriores o se "inserta" una fila entre los anteriores y se define el nuevo material (conviene insertar una fila en lugar de añadirla a continuación de las ya existentes. De este modo se redefinen las "áreas de datos" automáticamente). En el fichero F00BC.xls a los aceros anteriores se añade el de las armaduras pasivas. El valor de γ_M que se usa en los cálculos es 1.0. Puede cambiarse editando esta hoja (1.0 según EAE y EN 1993-1-8:2005 o 1.05 si se utiliza el CTE)

3. Hoja tornillos: Se definen las propiedades geométricas (d, d_0, A, A_s, etc.) de los tornillos usuales (M12, M16, M20, M22, M24, M27). Asimismo, se incluyen las distancias mínimas contempladas en EN 1993-1-8:2005 y las distancias mínimas basadas en criterios de accesibilidad derivados del uso de la maquinaria de apriete.
4. Hoja códigos: Aquí se definen algunas variables que se utilizan en el resto de las hojas.
5. Hoja Datos_PI: Se escriben en forma matricial las ecuaciones y restricciones que rigen el problema para facilitar la implementación del algoritmo (de Punto Interior) que las resuelve. En esta hoja se puede variar el dato Niter (número de iteraciones).
6. Hoja Resul_PI: Resultados del algoritmo antedicho.
7. Hojas dxf y dibujo: Contienen los datos necesarios para trazar un dibujo en formato dxf de la unión que se analiza. Cada vez que se modifica un dato en la hoja DATOS se actualizan estas hojas y el fichero gráfico, el cual se archiva en el directorio de trabajo (que normalmente es la carpeta "Mis Documentos").
8. La hoja licencia ya ha sido comentada.

Las hojas que a continuación se describen son las que normalmente se imprimirían a la hora de realizar un estudio profesional de la unión: son las hojas del libro que normalmente no estarán ocultas. Se ha seguido el criterio de nombrarlas con letras mayúsculas y su contenido es el siguiente:

1. Hoja PRESENTACION: En ella se incluye una descripción gráfica de la unión junto con unos criterios básicos de diseño y utilización.
2. Hoja DATOS: Esta es la única hoja que en un uso normal del libro de

cálculo el usuario final debe manipular. Las únicas celdas que deben modificarse son las coloreadas en verde claro. Los demás valores se ajustan automáticamente

Cuando existe alguna inconsistencia geométrica aparecerá el mensaje NO VÁLIDO en la casilla correspondiente

3. Hoja DISTANCIAS: Para cada fila de tornillos se chequean las distancias entre ellos (p) y la distancia al borde exterior de la chapa (e). Se comprueban las prescripciones de EN 1993-1-8:2005 y los valores mínimos por accesibilidad que dicta la experiencia. Las comprobaciones se realizan tanto en la dirección de transmisión del esfuerzo como en la perpendicular. Se calculan los factores de reducción β_{Lj} (unión larga EN 1993-1-8:2005 3.8), α y k_1 (tabla 3.4) de F_{bRd}. Para cada una de las comprobaciones la hoja devuelve los valores VÁLIDO o NO VÁLIDO de interpretación inmediata. En algunos casos el resultado de la hoja es *(VÁLIDO)*(entre paréntesis y en cursiva). Éste aparece cuando las distancias son mayores que los mínimos de EC3, pero tales que α es menor que 1 (es decir, la distribución de los tornillos no permite aprovechar toda la capacidad F_{bRd} de la chapa, lo que para las tipologías estudiadas en esta guía no suele ser la condición más restrictiva). Las distancias sólo resultan válidas si además de cumplir los mínimos, resultan concordantes con las dimensiones totales de la chapa frontal; comprobaciones que se realizan en la hoja DATOS.
4. Hoja NUDO: Se hacen diversas comprobaciones del perfil base.
5. Hoja FB: Es en esta hoja donde se realizan las principales comprobaciones de la unión tanto en ELU como en ELS. Estas son las siguientes:
    a. Comprobación de la unión en ELU
        i. Se comprueban, para cada tornillo, las condiciones
        $F_{v,Ed}/F_{v,Rd} + F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd} \leq 1$ y
        $F_{t,Ed}/F_{t,Rd} \leq 1$
        ii. Se chequean las condiciones de resistencia del perfil base
        iii. Se comprueban las ecuaciones de equilibrio para el conjunto de la unión.
    b. Comprobación de la unión en ELS

i. Se verifica que en servicio no se descomprimen las filas de tornillos
ii. Se comprueba que en servicio no se producen deslizamientos en la unión

Como anteriormente para cada comprobación la hoja devuelve los valores VÁLIDO o NO VÁLIDO.

6. Hoja CHAPA: En esta última hoja se comprueba la chapa frontal para varios mecanismos de colapso. Para los mecanismos que se denominan en las hojas M1 y M2 se han implementado dos algoritmos específicos elementales para fijar la posición de las charnelas.

2.3.2 Algoritmos

Actualmente los algoritmos están programados como varios "módulos" de VisualBasic.

En el primer módulo se encuentra el algoritmo que se destina a determinar la distribución de esfuerzos de cortadura y tracción entre los diferentes tornillos de la unión y el perfil base.

Como cualquier análisis rígido-plástico en el que las restricciones se han linealizado el problema de obtener la "mejor" distribución de esfuerzos se reduce a un problema matemático de programación lineal. La función IP es una mera trascripción del algoritmo para resolver esta clase de problemas descrito en el texto "Linear Programming: Foundations and Extensions. Robert J. Vanderbei. 2nd ed., springer 2001. (puede localizarse el texto en formato pdf en http://www.princeton.edu/_rvdb/LPbook/)". Únicamente se han "traducido" los nombres de las distintas matrices y vectores del texto original al "lenguaje estructural" de forma que resulte más sencillo de leer por un especialista en este área del conocimiento.

El algoritmo, tal como está formulado, permite obtener el máximo factor de carga para el cual se satisfacen las ecuaciones de equilibrio (primera regla que debe cumplirse en el diseño estructural) junto con cualesquiera otras restricciones lineales. Estas restricciones pueden ser de igualdad o de desigualdad, pudiendo fácilmente pasarse de una clase a otra mediante adecuadas variables de holgura positivas (que es lo que se hace en la hoja Datos_PI). El resultado del algoritmo se escribe sobre la hoja Resul_PI, donde junto al mayor factor de carga posible de las solicitaciones se presenta para dicho estado los esfuerzos en cada tornillo y en el perfil base, así como las distintas variables de holgura y duales (todas ellas con significado físico aun

cuando no se utilicen). Si el factor de carga máximo es mayor que 1 el diseño propuesto para la unión es satisfactorio. No ocurre así cuando este factor de carga es inferior a la unidad. Puesto que en la hoja FB se desea escribir una distribución de esfuerzos que satisfaga exactamente las ecuaciones de equilibrio, los esfuerzos obtenidos para el "estado óptimo" se dividen por el factor de carga máximo. Si este es menor que uno, se "amplificarán" los esfuerzos y no cumplirán las condiciones de resistencia. Por el contrario, cuando el factor de carga sea mayor que la unidad, los esfuerzos se "reducen" y cumplirán de sobra con los criterios de resistencia.

En el segundo "módulo" de VisualBasic se encuentran los algoritmos implementados para hallar un valor aproximado de la posición de las charnelas C1 y C2 para los modos de colapso de la chapa frontal que en las hojas se denominan M1 (mecanismo en forma de sobre) y M2. Para M1, supuestas horizontales las charnelas antedichas el algoritmo va situando C2 sobre las distintas filas de tornillos y C1 desde esa posición hasta la cota del ala inferior del perfil (en saltos de 10mm). De estas configuraciones se elige aquélla para la cual se obtiene un m_p mayor. Para M2 el algoritmo es más sencillo pues sólo tiene que variar la posición de C2. En una segunda iteración ambos algoritmos repiten los cálculos intercambiando las charnelas C1 y C2 por las C3 y C4. De este modo se comprueban posibles mecanismos para flexiones positivas.

Ambos algoritmos son toscos, pero robustos y muy rápidos.

El algoritmo para obtener la distribución de esfuerzos en cada fila de tornillos en ELS ($F_{x,ser}$), difiere de los anteriores en que se implementa sobre la propia hoja de cálculo, sin necesidad de recurrir a una función de VisualBasic. Además su fundamento es distinto del que posteriormente se utilizará en los cálculos manuales por lo que se describe a continuación.

El método aproximado propuesto en los capítulos siguientes, que consiste en tomar como brazo de palanca para el ELS el del ELU, resulta difícil de extrapolar e implementar cuando el número de filas de tornillos no está prescrito a priori. En su lugar se propone otro método, también aproximado, en el cual se analiza una sección ideal "fisurada": no se cuenta con tracciones en la sección del perfil base, mientra que, por el contrario, los tornillos sólo se contabilizan cuando están traccionados.

El cálculo de las constantes estáticas de una sección fisurada es trivial si se conoce la posición de la fibra neutra: basta no considerar la parte "traccionada" del perfil base ni los TR comprimidos. Con ayuda de una hoja de cálculo determinar con precisión suficiente la posición de la fibra neutra es

asimismo otro ejercicio trivial, siempre que sean posible las referencias cruzadas. Junto con los valores de A, e I se determina el c.d.g de la sección y se hace que la celda en la cual se introduce la cota de la línea neutra sea igual a la celda en la que se calcula el c.d.g. (en algunas ocasiones –frecuentemente si se interrumpen los cálculos sin haber concluido- las celdas con referencias cruzadas dan un error. Para subsanarlo se asigna un valor fijo arbitrario a la cota de la línea neutra y a continuación se iguala la celda anterior a la que muestra el c.d.g de la sección. Cuando se produce este error en la propia hoja de cálculo se indican los pasos a seguir para subsanarlo. Obviamente debe estar activada la opción del programa que permite referencias cruzadas y es recomendable que el número de iteraciones se fije en 1000).

Calculadas las constantes estáticas de esta sección ideal fisurada la obtención de las fuerzas $F_{x,ser}$ es trivial de acuerdo con las leyes de la resistencia de materiales.

2.3.3 Introducción de datos

Como se ha indicado el usuario final de las hojas de cálculo normalmente sólo tiene que manipular las casillas coloreadas en verde claro de la hoja DATOS. Los datos que se introducen son los siguientes

1. Solicitaciones de cálculo de la unión y coeficiente γ_f
2. Perfil o perfiles de la unión, clase de acero y ancho de garganta de las soldaduras.
3. Geometría de la chapa frontal, clase de acero y coeficiente de rozamiento
4. Métrica de las distintas filas de tornillos y clase de acero de los mismos
5. Número de tornillos de cada fila y distancias entre ellos. Cuando exista alguna inconsistencia geométrica en las distancias facilitadas aparecerá el mensaje NO VÁLIDO en la casilla correspondiente

En alguna situación “patológica” el algoritmo IP, brevemente descrito previamente, puede no converger con el número de iteraciones preestablecido en la hoja (oculta) Datos_PI. En este caso el usuario puede modificar el número de iteraciones del algoritmo introduciendo el nuevo valor en la única casilla coloreada en verde claro de dicha hoja.

Las casillas “$\alpha\backslash e_z$” de la hoja DISTANCIAS permite considerar en el cálculo de α (tabla 3.4 de EN 1993-1-8:2005) el término debido a e_1 (distancia al borde en la dirección de transmisión del esfuerzo) u omitirlo. Esto tiene

sentido si el aplastamiento del borde de la chapa esta coaccionado (por ejemplo cuando el ala de los perfiles están soldados a estos bordes). Aun siendo un dato que puede modificar el usuario no se ha seguido el código de colores de la hoja DATOS, pues en el uso habitual de las fichas esta opción raramente se considerará.

2.3.4 Interpretación de resultados

Como se ha visto la interpretación de los resultados es trivial. Cada libro de cálculo propone una distribución de fuerzas tanto en los tornillos como en el perfil base, obtenida automáticamente de acuerdo con el algoritmo someramente descrito. Para este estado se comprueban los distintos eslabones que componen la unión resaltándose su validez o invalidez. De este modo, una rápida inspección visual de la hoja permite aceptar o rechazar el diseño de la unión.

Junto a estos resultados se crea un fichero gráfico de la unión en formato dxf. El objeto de dicho fichero es poder incluir de forma inmediata en la documentación gráfica del proyecto los resultados del análisis, si bien, es responsabilidad del usuario asumir los cálculos y los dibujos propuestos o modificarlos según su propio criterio.

2.4 RECOMENDACIONES SOBRE CONTROL DE CALIDAD.

Las conclusiones, recomendaciones y métodos de cálculo expuestos en los capítulos que siguen a no deben extenderse más allá de los límites sancionados por la experiencia. En particular puede resultar temerario el uso no crítico de los “libros de cálculo” que se distribuyen con esta guía, al no limitarse en ellos el número de tornillos por fila ni el número de estas, lo que se deja al buen criterio del usuario de las mismas. Debe hacerse constar que el respaldo experimental a este tipo de uniones es bueno para las que tienen una fila horizontal en la prolongación de la chapa frontal y una fila en cada lado del alma vertical, pero inexistente para mayor número. Sin embargo, en muchas uniones con perfiles de gran calibre y de “resistencia completa” (su resistencia es mayor o igual que la de los elementos que conecta) o casi completa no se encuentra una solución con dicha disposición de tornillos. En las uniones estudiadas en esta guía se permite ampliar el número de tornillos a cada lado del alma del perfil a dos (y para las uniones solicitadas a tracción en algunos ejemplos de los libros de cálculo se llega hasta tres).

3 UNIONES ATORNILLADAS FRONTALES EN FLEXIÓN SIMPLE, TIPO FB: RECRECIDAS SOBRE LA CARA SUPERIOR DEL PERFIL.

3.1 DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN.

Este tipo de unión atornillada frontal merecería ser la estándar en edificación por la cantidad de documentación técnica disponible sobre la misma, si no fuera por el grave inconveniente de que la chapa frontal queda peraltada por encima de la cara superior del perfil. El artículo 6 de EN 1993-1-8:2005 detalla los criterios de cálculo aplicables en caso de que dicha unión sirva para materializar un nudo rígido entre viga y pilar. En ese caso normalmente las interferencias debidas al resalto de esta unión atornillada no se producen, si la viga se dispone descolgada por debajo de un forjado de piso.

Sin embargo, esta unión es prácticamente inviable (sin modificaciones que se exponen en otra unión posterior) para los embrochalamientos de las viguetas de apoyo de un forjado mixto de chapa grecada. También se crean dificultades constructivas casi insalvables cuando los perfiles sustentan directamente una chapa "deck" de cubierta o paneles de cubierta similares.

Existe no obstante un caso práctico en el que dicho tipo de cubierta es perfectamente compatible con esta clase de unión atornillada (FB), y ese caso es además frecuente en las cubiertas de grandes superficies comerciales. Se trata de plantas de luces bidireccionales iguales o similares, de órdenes comprendidos entre los 14 a 18 m, que requieren una "triple familia de flexión": jácenas (G) trianguladas o de alma llena, vigas secundarias (B) resolubles con perfiles de alma llena, y correas (P). Las vigas secundarias (B) se pueden optimizar adecuadamente siempre que se doten de continuidad, y entonces son factibles con perfiles de alma llena, de mínimo coste de fabricación y gran rapidez de ejecución, frente a la siempre complicada realización in situ de embrochalamientos de dos familias de vigas trianguladas.

Con uniones "FB", si las vigas B se descuelgan por debajo de la superficie de cubierta exactamente a una distancia igual al canto de las correas (P), existe perfecta compatibilidad geométrica entre las tres familias de piezas (ver figuras), y se pueden diseñar uniones in situ de gran capacidad, con la fiabilidad y rapidez características de la construcción metálica atornillada.

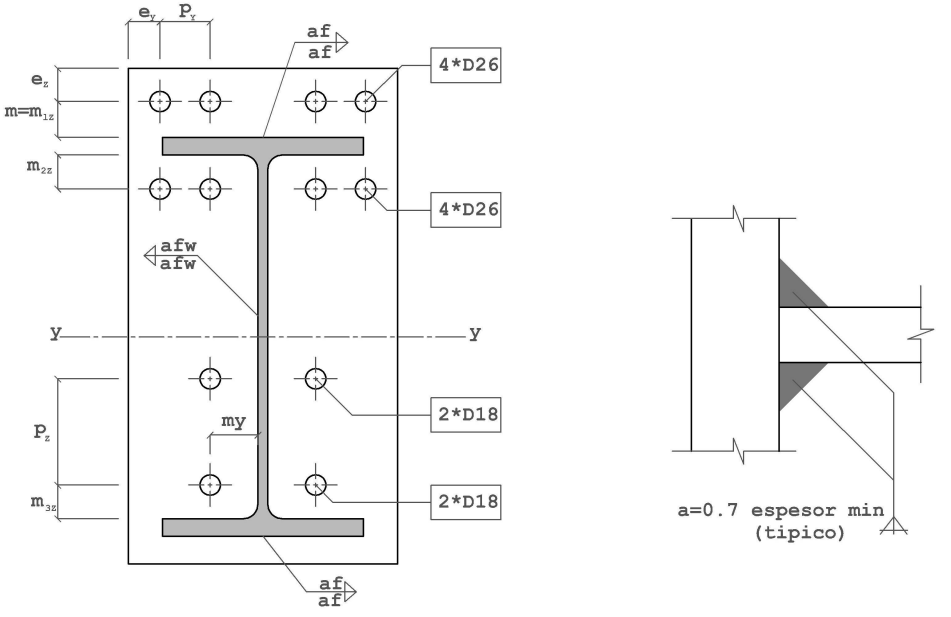


figura 6: Unión atornillada frontal. Disposición FB

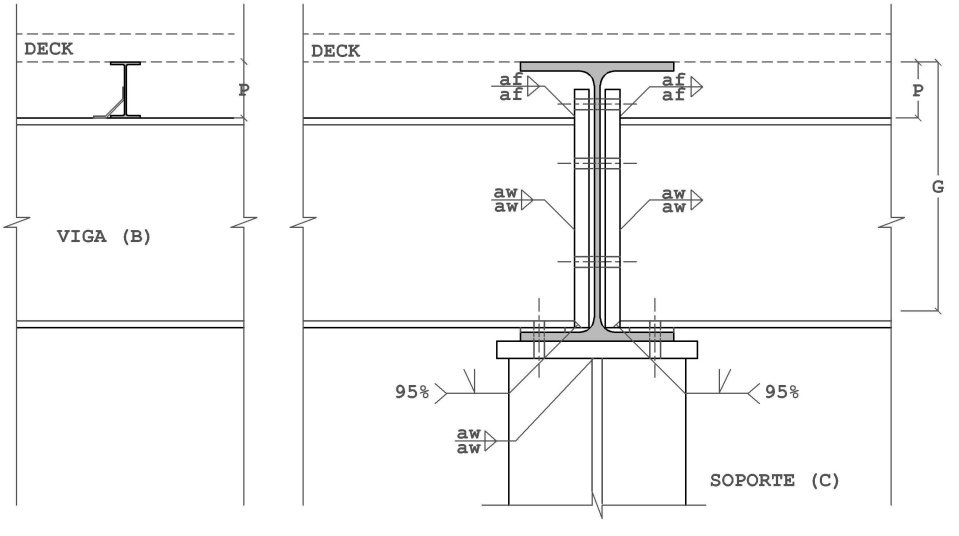


figura 7: Solución 1: Uniones in situ

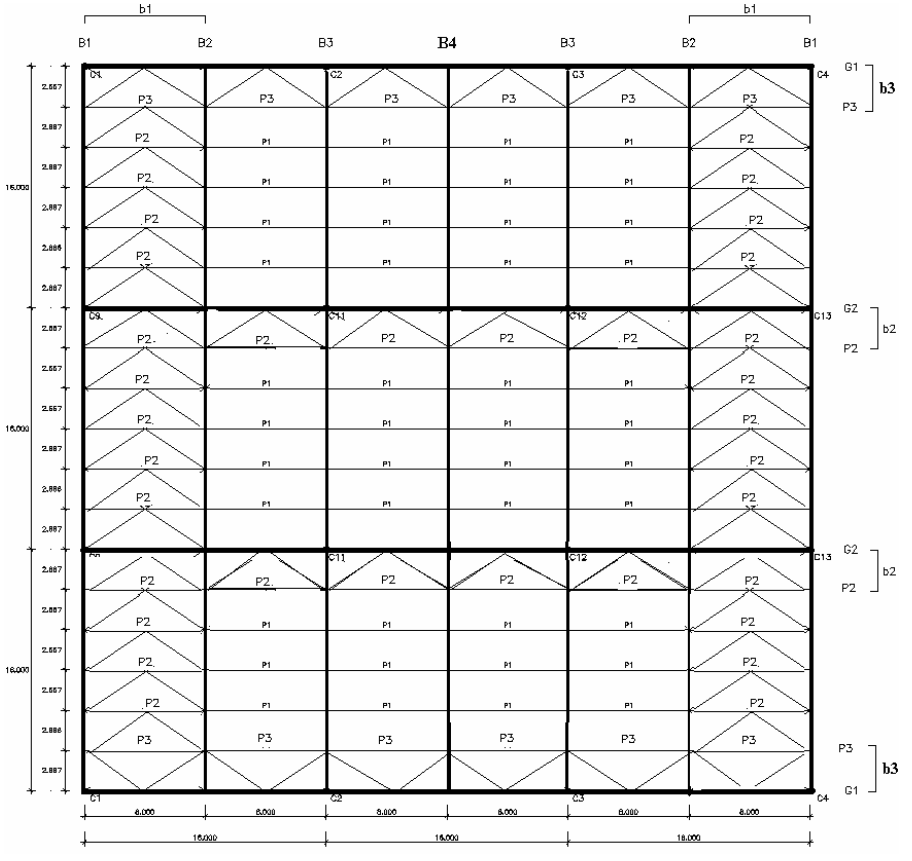


figura 8: Módulo de cubierta típico entre juntas de dilatación, con dos o más vanos continuos en cada dirección

Tabla 8

Jácenas	Girders	G
Vigas	Beams	B
Correas	Purlins	P
Soportes	Columns	C
Arriostramientos	Bracings	B

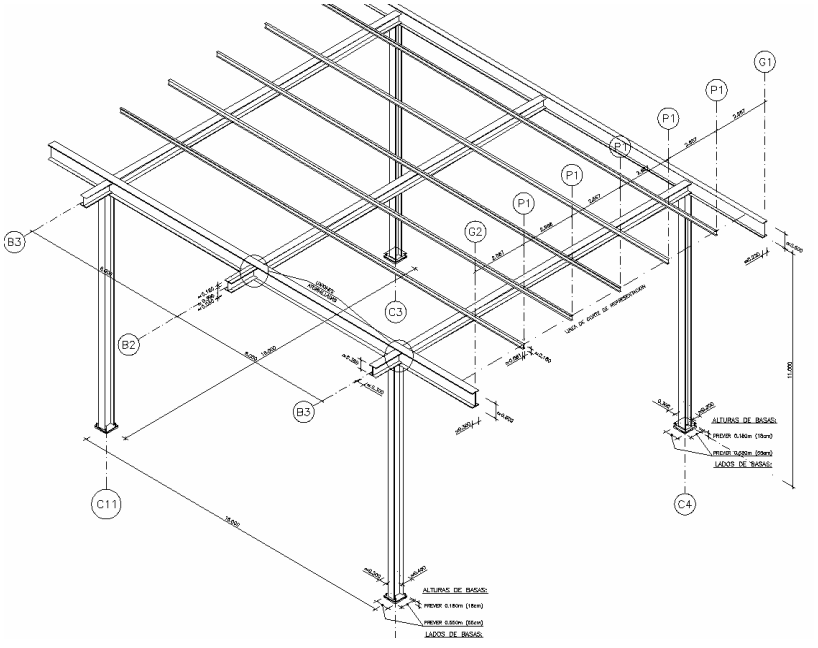


figura 9: Solución 1. Jácenas principales (G) de alma llena

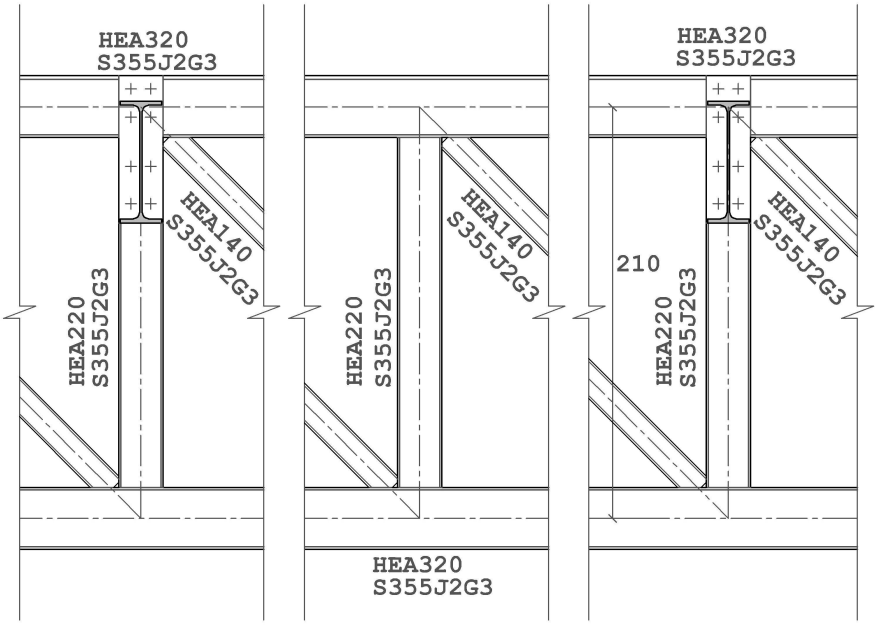


figura 10: Solución 2. Jácenas principales (G) trianguladas.

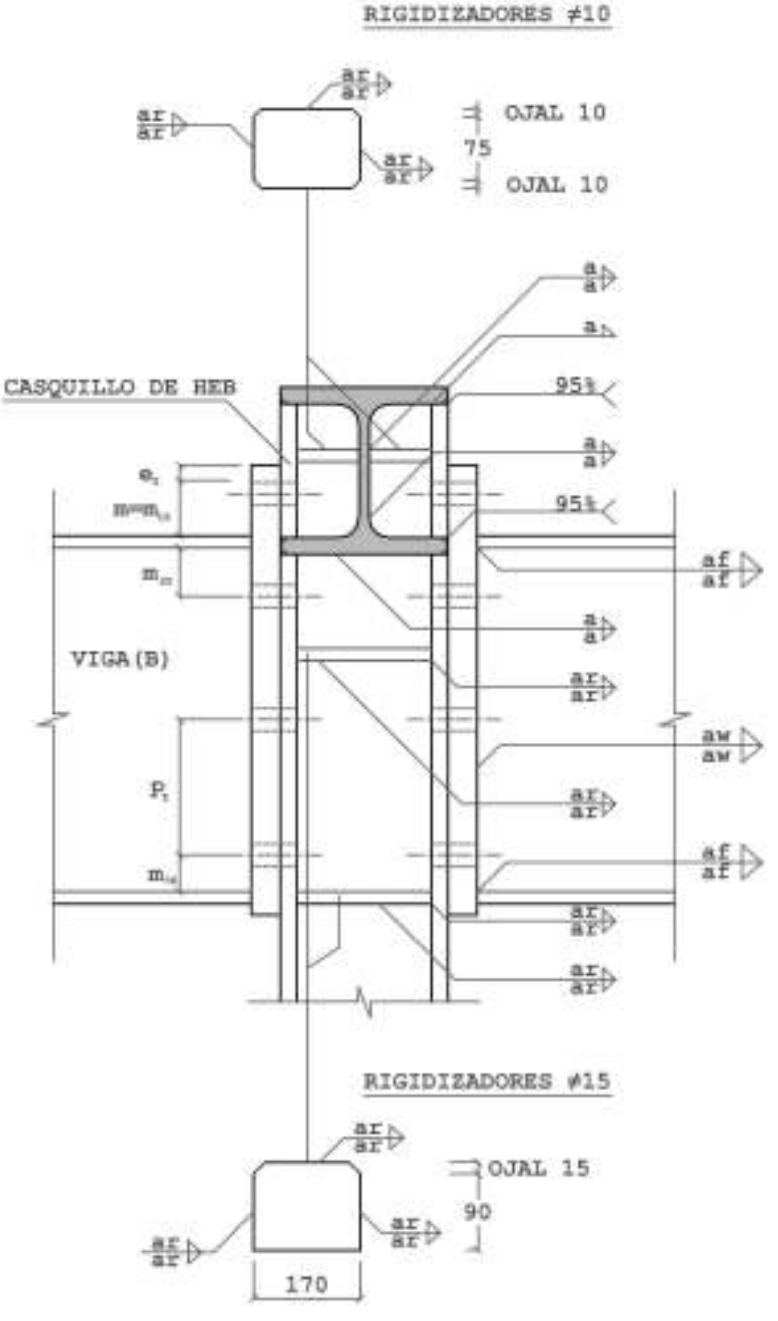


figura 11: Solución 2. Detalle de uniones principales in situ.

3.2 EJEMPLO NUMÉRICO DESARROLLADO.

En este apartado se desarrollan los cálculos para la unión particular que se describe a continuación. La mayoría de los comentarios a estos cálculos, comunes al resto de uniones que se estudian en otros capítulos, pueden encontrarse en el apartado 2.2.

FB IPE 450 (S275). Nudos continuos.

La unión se emplea para equilibrar el cortante y el momento negativo de extremo de la viga que, sea por razones de continuidad o de rigidez del elemento contiguo, tiene fuertemente impedida la rotación en el extremo enl**aza**do. Es susceptible de empleo en el enlace de piezas isostáticas como los voladizos.

TORNILLOS			
A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1) Superficies preparadas y/o tratadas para $\mu \geq 0.5$ (EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejoG)			
El par de apriete para tornillos de alta resistencia (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento.			
Valores característicos (N/mm^2)		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 1000$	$f_{yb} = 900$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1.25$

Definición de la Unión: FB IPE 450 (S275) Nudos continuos			
Chapa frontal S275JR Control ultrasónico específico según UNE 36100 y 7278 al grado B			Calzo/forro para tolerancia S275JR
# 290·535·35 Soldaduras de alas ◢◣ 8.5. Soldaduras de alma ◢◣ 6.			g ≤ 15 mm.
Tornillos superiores		**Tornillos inferiores**	
Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)	Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)
2M27 2M27 (taladros ϕ 30)	$e_z = 40$ $m_{1z} = 45$ $m_{2z} = 45$	2M16 2M16 (taladros ϕ 18)	$m_y = 70$ $p_z = 165$ $m_{3z} = 45$

FB IPE 450 (S275). Nudos extremos sin continuidad.

La unión se emplea para la transmisión de la reacción vertical de extremo, sin momento, por unirse a una chapa –alma de viga, etc- sin rigidez rotacional, chapa que debe ser comprobada para la superposición de sus esfuerzos propios con los de la entrada de carga a través del enlace.

Aunque los cálculos de esta unión no se detallan (pueden reproducirse inmediatamente con el libro de cálculo FB.xls facilitado), su interés se fundamenta en que en las vigas habituales las uniones sin continuidad son comunes en sus extremos.

TORNILLOS			
A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1) Superficies preparadas y/o tratadas para $\mu \geq 0.5$ (EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejoG)			
El par de apriete para tornillos de alta resistencia (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento.			
Valores característicos (N/mm^2)		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 1000$	$f_{yb} = 900$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1.25$

Definición de la Unión **FB IPE 450 (S275).Uniones extremas sin continuidad**			
Chapa frontal S275JR Control ultrasónico específico según UNE 36100 y 7278 al grado B			Calzo/forro para tolerancia S275JR
# 200·535·25 Soldaduras de alas ◢◣ 6. Soldaduras de alma ◢◣ 6.			g ≤ 15 mm.
Tornillos superiores		**Tornillos inferiores**	
Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)	Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)
2M16 2M16 (taladros ϕ 18)	$e_z = 50$ $m_{1z} = 35$ $m_{2z} = 40$	2M16 2M16 (taladros ϕ 18)	$m_y = 50$ $p_z = 165$ $m_{3z} = 45$

Capacidad resistente del perfil base en flexión simple (IPE450):

$V_{pl,Rd} = 5085 \cdot 275/1.0/\sqrt{3}$ N = 807 kN, $M_{pl,Rd} = 1702000 \cdot 275/1.0$ Nmm = 468 kNm				
$V_{Rd} = V_{pl,Rd} \cdot (1+\sqrt{\rho})/2$ EN 1993-1-8 6.2.8(3)	$\rho = 0$	$\rho = (1/3)^2$	$\rho = (2/3)^2$	$\rho = 1$
	$(1/2)V_{pl,Rd}$	$(2/3)V_{pl,Rd}$	$(5/6)V_{pl,Rd}$	$V_{pl,Rd}$
	404	538	673	807
$M_{V,Rd} = M_{pl,Rd} - \rho/4 \cdot A_v^2 \cdot f_{yd}/t_w$ EN 1993-1-8 6.2.8(5)	$M_{pl,Rd}$	$M_{pl,Rd}$ – 21	$M_{pl,Rd}$ – 84	$M_{pl,Rd}$ – 189
	468	447	384	279

Solicitaciones nominales de la unión:

$V_{Ed} = (1/2)V_{pl,Rd}$ 404 kN $M_{Ed} = -M_{pl,Rd} =$ -468 kNm

$\gamma_f = 1.43$

$V_{E,ser} =$ 282 kN $M_{E,ser} =$ -327 kNm

3.2.1 Cálculo 1º: Chapa frontal supuesto modo 3, según EN 1993-1-8:2005 tabla 6.2

En este primer cálculo se dimensiona la chapa frontal de forma que el fallo de la unión se produce por el agotamiento de los tornillos. EN 1993-1-8:2005 en el artículo 6.2.6.5 modela la prolongación de la chapa frontal sobre el perfil base de estas uniones como un casquillo de T en tracción (artículo 6.2.4): Además del mecanismo estudiado en este apartado son posibles un segundo mecanismo por plastificación completa del ala del casquillo y un tercer mecanismo combinado en el que se produce el fallo de los tornillos y del ala del casquillo simultáneamente. En el apartado 3.2.2 se estudia este último mecanismo.

ELU según EN 1993-1-8:2005

Cálculos preliminares:

▪ Reducción de $F_{v,Rd}$ por forros. Artículo 3.6.1 (12):

M27: $\beta_p = 9 \cdot 27/(8 \cdot 27+3 \cdot 15)$ $\beta_p = 0.931$

M16: $\beta_p = 9 \cdot 16/(8 \cdot 16+3 \cdot 15)$ $\beta_p = 0.832$

▪ Resistencias de cálculo de cada tornillo. Tabla 3.4

M27: $F_{t,Rd} = 0.9 \cdot 459 \cdot 1000/1.25$ N 330 kN

$F_{v,Rd} = 0.931 \cdot 0.6 \cdot 573 \cdot 1000/1.25$ N 256 kN

M16: $F_{t,Rd} = 0.9 \cdot 157 \cdot 1000/1.25$ N 113 kN

$F_{v,Rd} = 0.832 \cdot 0.6 \cdot 201 \cdot 1000/1.25$ N 80.3 kN

▪ Resistencia de TR solicitados a tracción y cortante: $F_{v,Ed}/F_{v,Rd}+F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd}\leq 1$

M27:	73/256 + 330/(1.4·330) =	1
M16:	23/80.3 + 113/(1.4·113) =	1

Conjunto de la unión

Sin considerar rozamiento en la zona de compresión y distribuyendo fuerzas en tornillos con criterios plásticos:

	F_z (kN)	F_x (kN)	z (m)
TR fila 1ª	60↓	660→	-0.270↑
TR fila 2ª	61↓	660→	-0.165↑
Eje de la pieza ----------			
TR fila 3ª	160↓	0	0
TR fila 4ª	160↓	0	0.165↓
Zona de compresión	0	-557←	0.103↓
	0	-763←	0.218↓
V_{Rd} =	$\Sigma F_z = 441$		
N_{Rd} =		$\Sigma F_x = 0$	
M_{Rd} =			$\Sigma F_x \cdot z = -511$ kNm
$\lvert V_{Ed}/V_{Rd}\rvert$ =	**0.916 < 1**		
$\lvert M_{Ed}/M_{Rd}\rvert$ =			**0.916 < 1**

La distribución de "fuerzas internas" (F_x, F_z) adoptada, no es la única posible que cumple todas las condiciones de equilibrio ($\sum F_x = N_{Ed} = 0$, $\sum F_z = V_{Ed}$, $\sum F_x \cdot z = M_{Ed}$) y de resistencia ($F_{v,Ed}/F_{v,Rd} + F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd} \leq 1$, $F_{t,Ed}/F_{t,Rd} \leq 1$, etc.); pero uno de los teoremas fundamentales de la teoría de la plasticidad ("teorema estático") permite validar la seguridad en ELU tan sólo con encontrar una solución completamente equilibrada que verifique todos los límites resistentes de los elementos. En la práctica, se debe tener en cuenta el carácter finito de la ductilidad de los materiales reales, que limita la aplicación de dicho teorema a distribuciones de esfuerzos no incompatibles con dicha ductilidad real, siempre más o menos limitada. En el diseño de uniones metálicas de edificación, bajo cargas predominantemente estáticas, y con tipologías de uniones apropiadas, basta en general para cumplir lo anterior con que los diseños y criterios aplicados sean coherentes con aquellos que la experimentación y la buena práctica constructiva dictan como válidos a dicho efecto.

Chapa frontal:

▪ Flexión: EN 1993-1-8:2005 tabla 6.2 y figura 6.2.
$M_{Ed} = 2F_{t,Rd}(m-0.8a\sqrt{2})/b = 660\cdot(45-9.6)/290 = 80.6$ kNmm/mm
$W_{pl} = b_p t_p^2/4$, $M_{pl,Rd} = W_{pl,}f_{yd} = (1\cdot 35^2/4)\cdot 265/1.0 = 81.2$ Nmm/mm, donde se ha tomado el límite elástico garantizado según UNE-EN-10025 para chapas de S275JR con espesores entre 16 y 40 mm.

$|M_{Ed}/M_{Rd}|$ = 80.6/81.2 **0.993<1**

▪ Resistencia a aplastamiento de la chapa frontal ($F_{b,Rd}$).
Reducción de $F_{b,Rd}$ por "unión larga" según el artículo 3.8:
M27: $L_j = 435.4$ $\beta_{Lf} = 1-(435.4-15\cdot 27)/(200\cdot 27) = 0.99$
M16: $L_j = 435.4$ $\beta_{Lf} = 1-(435.4-15\cdot 16)/(200\cdot 16) = 0.94$

Para el cálculo de L_j se ha considerado la distancia entre tornillos extremos en la dirección de la transmisión del esfuerzo V_z pues, como se aprecia en la distribución de esfuerzos en el conjunto de la unión, todos los tornillos tienen una componente F_z significativa. En uniones con cocientes de utilización alejados de 1 es posible que sólo con la capacidad de los tornillos inferiores se satisfaga la condición $|V_{Ed}/V_{Rd}| <1$, en cuyo caso el valor adoptado en el texto para L_j sería conservador.

Cálculo de $F_{b,Rd}$ según tabla 3.4 suponiendo $k_1 = 2.5$:
M27: $\alpha = \min [40/(3\cdot 30), 104.6/(3\cdot 30)-1/4, 1000/410, 1] = 0.444$
$F_{b,Rd} = 0.99\cdot 2.5\cdot 0.44\cdot 35\cdot 27\cdot 410/1.25$ N = 338 kN (más favorable que $F_{v,Rd}$)
M16: $\alpha = \min [59.6/(3\cdot 18), 165/(3\cdot 18)-1/4, 1000/410, 1] = 1$
$F_{b,Rd} = 0.94\cdot 2.5\cdot 1\cdot 35\cdot 16\cdot 410/1.25$ N = 433 kN (más favorable que $F_{v,Rd}$)

ELS (categoría B) según EN 1993-1-8:2005

Pretensado y resistencia a deslizamiento. Artículos 3.6.1 y 3.9.1:
M27: $F_{p,C} = 0.7\cdot 459\cdot 1000$ N = 321 kN
$F_{s,Rd,ser} = 0.5\cdot 0.7\cdot 459\cdot 1000/1.1$ = 146 kN

M16: $F_{s,Rd,ser} = 0.5\cdot 0.7\cdot 157\cdot 1000/1.1$ = 50 kN

Descompresión:

Se toma aproximadamente para la siguiente comprobación el brazo mecánico del cálculo en ELU :
Z = 468 kNm /(2·660 kN) = 0.355 m
N = M/Z = 327/0.355 = 921 kN
$N/4F_{p,Cd} = 921/(4\cdot 321/1.1)$ = **0.789<1**

(Por lo tanto en servicio no se descomprime la unión)

Rozamiento:

Término de $F_{s,Rd,ser}$ debido a los TR superiores = $4 \cdot 146 - \mu\ M/Z$

Término de $F_{s,Rd,ser}$ debido a los TR inferiores = $4 \cdot 50 + \mu\ M/Z$

Conjunto de la unión_ ($V_{Rd,ser}$ independiente de M)

$V_{Rd,ser} = (4 \cdot 146 - \mu\ M/Z)+(4 \cdot 50 + \mu\ M/Z)$ 784 kN

$|V/V_{Rd,ser}| = 282/784$ **0.360<1**

(Por lo tanto en servicio no se producen deslizamientos).

3.2.2 Cálculo 2º: Ejemplo de cálculo de la chapa frontal en modos 1 y 2, según EN 1993-1-8:2005 tabla 6.2.

Con objeto de optimizar la unión y para mostrar los cálculos necesarios cuando el mecanismo de colapso de la chapa frontal es el 2 de la tabla 6.2 de EN 1993-1-8: 2005 se reduce el ancho de la chapa frontal de 290mm a 200mm.

Para la nueva geometría de la unión es claro que la comprobación de la chapa frontal va a ser condicionante. Siguiendo los pasos del cálculo 1 y considerando el mismo modo de colapso se tendrá $M_{Ed} = 2F_{t,Ed}(m-0.8a\sqrt{2})/b =$ $660 \cdot (45-9.6)/200 = 116.8$ kNmm/mm muy superior al valor de $M_{pl,Rd}$ ya calculado (81.2 kNmm/mm). Antes de invalidar la solución (E/R = 116.8/81.2 = 1.44>>1) deben comprobarse los modos de colapso propuestos por EN 1993-1-8:2005 incluyendo las fuerzas de palanca Q. Estas fuerzas harán disminuir el valor de M_{Rd} del conjunto de la unión (efecto desfavorable), pero también el valor de M_{Ed} de la chapa frontal (efecto favorable), lo que en conjunto puede permitir validar el diseño propuesto.

El valor de Q se obtiene a partir de la condición de agotamiento de la chapa frontal:

$M_{Ed} = (2F_{t,Rd}(m-0.8a\sqrt{2})-Q(s+m-0.8a\sqrt{2})/b = M_{pl,Rd} =$ 81.2

$(660 \cdot (45-9.6)/200-Q(85-9.6)/200 = 81.2$ $Q = 94.5$

De este modo, la comprobación de la sección de la chapa frontal definida por la soldadura del ala superior del perfil base se reduce verificar $M_{Ed}/M_{pl,Rd} = 1 \leq 1$.

Del mismo se comprueba la sección definida por la línea de tornillos

$M_{Ed} = Q \cdot s/200 = 94.5 \cdot 35/200 = 16.5$ 16.5/81.2 = **0.203<1**

(cuando está comprobación sea condicionante –modo 1 de la tabla 6.2 de EN 1993-1-8:2005 debe considerarse el valor de d_0 para estimar $M_{pl,Rd}$; el factor E/R es tan pequeño que en este caso no es necesario precisar más el valor del momento respuesta de la chapa frontal)

Con el valor obtenido de Q se vuelve a comprobar el conjunto de la unión en ELU:

ELU según EN 1993-1-8:2005

Cálculos preliminares:

▪ Reducción de $F_{v,Rd}$ por forros. Artículo 3.6.1 (12):

M27:	$\beta_p = 9\cdot27/(8\cdot27+3\cdot15)$	$\beta_p = 0.931$
M16:	$\beta_p = 9\cdot16/(8\cdot16+3\cdot15)$	$\beta_p = 0.832$

▪ Resistencias de cálculo de cada tornillo. Tabla 3.4

M27:	$F_{t,Rd} = 0.9\cdot459\cdot1000/1.25$ N	330 kN
	$F_{v,Rd} = 0.931\cdot0.6\cdot573\cdot1000/1.25$ N	256 kN
M16:	$F_{t,Rd} = 0.9\cdot157\cdot1000/1.25$ N	113 kN
	$F_{v,Rd} = 0.832\cdot0.6\cdot201\cdot1000/1.25$ N	80.3 kN

▪ Resistencia de TR solicitados a tracción y cortante: $F_{v,Ed}/F_{v,Rd}+F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd}\leq1$

M27:	73/256 + 330/(1.4·330) =	1
M16:	23/80.3 + 113/(1.4·113) =	1

Conjunto de la unión

Sin considerar rozamiento en la zona de compresión y distribuyendo fuerzas en tornillos con criterios plásticos:

	F_z (kN)	F_x (kN)	z (m)
Q		-94.5←	-0.310↑
TR fila 1ª	47↓	660→	-0.270↑
TR fila 2ª	47↓	660→	-0.165↑
Eje de la pieza ----------			
TR fila 3ª	160↓	0	0
TR fila 4ª	160↓	0	0.165↓
Zona de compresión	0	-462.5←	0.121↓
	0	-763←	0.218↓

V_{Rd} =	$\Sigma F_z = 414$		
N_{Rd} =		$\Sigma F_x = 0$	
M_{Rd} =			$\Sigma F_x\cdot z = -480$ kNm

$|V_{Ed}/V_{Rd}|$ = **0.976 < 1**

$|M_{Ed}/M_{Rd}|$ = **0.975 < 1**

El resto de comprobaciones son idénticas a las del cálculo1.

Si en algún caso el modo de colapso es el 1 (tabla 6.2 de EN 1993-1-8:2005), el valor de Q se fija con la condición de que se agote la chapa frontal en la línea definida por los tornillos. En este caso para conseguir la condición $M_{Ed}/M_{pl,Rd} = 1$ sobre la sección definida por la soldadura del ala superior del perfil base, el valor de F_x en la primera fila de los TR será inferior al valor de $n \cdot F_{t,Rd}$.

3.3 EXPLICACIÓN DEL USO DEL LIBRO DE CÁLCULO DISPONIBLE EN http://catedracero.ee.upm.es, CON REFERENCIA AL MISMO EJEMPLO ANTERIOR.

3.3.1 Consideraciones generales

Las notas generales del apartado 2.3 son directamente aplicables a esta unión por lo que no se repiten. A continuación realizan algunas aclaraciones particulares sobre el libro que permite comprobar la unión tipo FB

3.3.2 Datos

La unión, siguiendo los criterios generales, se define en la hoja DATOS. Se caracteriza mediante la fila de tornillos situada sobre el ala superior del perfil (TR1), la inmediatamente inferior (TR2) y un grupo de tornillos que engloba el resto de filas de la unión. El número de filas del último grupo puede variar de 1 hasta 6. Así, con un único libro de cálculo se pueden estudiar, si no todas las disposiciones posibles, al menos un número de uniones del tipo FB suficientemente amplio y variado.

Los datos con los que se ha cumplimentado la hoja DATOS del fichero que se distribuye en www://catedracero.ee.upm.es corresponden al "cálculo 1" realizado previamente. La figura siguiente es una imagen de dicha hoja de cálculo

3.3.3 Resultados

Comprobaciones del estado límite último:

Para cada una de las 8 filas de tornillos se comprueban las dos condiciones $F_{v,Ed}/F_{v,Rd} + F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd} \leq 1$ y $F_{t,Ed}/F_{t,Rd} \leq 1$. En el fichero que se facilita se han

ocultado las comprobaciones para las filas de tornillos TR5 a TR8, que no están activas para el diseño propuesto (actualmente está implementado un algoritmo burdo que "oculta"/"muestra" de forma automática las comprobaciones de las filas de TR "no activas"/"activas". Por desgracia si el usuario final manipula la hoja de cálculo insertando o eliminando filas tendrá que manipular a su vez el algoritmo para que vuelva a funcionar correctamente. En versiones posteriores se espera que esta labor también se realice automáticamente).

Por la misma razón permanecen ocultas las filas en las que se muestran los esfuerzos en los TR antedichos y aquéllas en las que se comprueba el aplastamiento de la chapa.

Además de los tornillos se comprueba la sección comprimida del perfil base y las ecuaciones de equilibrio del conjunto.

La hoja FB tiene un apartado titulado "Fuerzas de palanca". En él se muestra el valor de la fuerza Q con la que se realizó el "cálculo 2" anterior. Para los datos con los que se distribuye el fichero el valor de Q es cero (en realidad es un valor próximo a cero, lo que no debe extrañar debido a la propia naturaleza numérica del algoritmo IP), pero puede verificarse, sustituyendo los valores de la hoja DATOS por los correspondientes al "cálculo 2" del apartado 3.2.2, que Q puede tomar valores no nulos. En suma, la hoja de cálculo comprueba de forma automática los modos de colapso 1, 2 y 3 propuestos en la tabla 6.2 de EN 1993-1-8:2005.

Comprobaciones del estado límite de servicio.

Igual que en los cálculo del ELU se han ocultado las filas de los TR no activos en el cálculo de la sección fisurada. Sin embargo, por razones obvias, la comprobación de la descompresión sólo se hace sobre los TR extremos de la unión. La comprobación en los TR inferiores tiene sentido pues en los cálculos no se ha prejuzgado el signo del momento flector que actúa sobre la unión. Se recuerda que en algunas ocasiones –frecuentemente si se interrumpen los cálculos sin haber concluido- las celdas con referencias cruzadas que se utilizan para realizar esta comprobación dan lugar a un error. El modo de subsanarlo ya se describió en 2.3.2.

La chapa frontal se comprueba en la hoja CHAPA para los modos de colapso 1, 2 y 3 ya comentados. También se chequean los mecanismos M1, M2 y M3, aunque para esta unión no suelen ser condicionantes. La descripción de estos mecanismos puede encontrarse en el capítulo 4 dedicado a las uniones

F00B.

Las figuras que siguen son varias hojas de libro de cálculo FB, particularizadas para el diseño 3.2.1.

figura 12: Hoja DATOS particularizada para el diseño 3.2.1

CÁLCULO DE UNIONES FRONTALES FB

TITULO CÓDIGO 090531

02/14/07 Hoja 5/6

Resistencia de cada TR: ELU según EN 1993-1-8: 2005

	$\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}}$	+	$\frac{F_{v,Ed}}{1,4F_{v,Rd}}$	≤ 1	$\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}}$	< 1	
TR fila 1:	47,69 / 256		302,94 / 462	≤ 1	0,92	< 1	VÁLIDO
	0,19	+	0,66	=	0,84	< 1	VÁLIDO
TR fila 2:	47,72 / 256		302,90 / 462	≤ 1	0,92	< 1	VÁLIDO
	0,19	+	0,66	=	0,84	< 1	VÁLIDO
TR grupo 3: TR fila 3:	53,26 / 80,3		0,00 / 156,2	≤ 1	0,00	< 1	VÁLIDO
	0,66	+	0,00	=	0,66	< 1	VÁLIDO
TR grupo 3: TR fila 4:	53,33 / 80,3		0,05 / 156,2	≤ 1	0,00	< 1	VÁLIDO
	0,66	+	0,00	=	0,66	< 1	VÁLIDO

Esfuerzos en los TR:

	$F_{t,Ed}$	$F_{v,Ed}$	z	M_s
TR fila 1:	95,39	605,89	-0,270	-163,59
TR fila 2:	95,43	605,79	-0,165	-100,20
TR grupo 3:				
TR fila 3:	106,52	0,43	0,000	0,00
TR fila 4:	106,66	0,10	0,165	0,02

Fuerzas de palanca:

	F_s	z	M_s
Q	-0,09	-0,310	0,00

Esfuerzos en el perfil: **Resistencia del perfil**

	F_s	z	M_s	R	E/R			
ala superior	-0,13	-0,218	0,03	763	0,00	<	1	VÁLIDO
alma 1	-0,21	-0,158	0,03	272	0,00	<	1	VÁLIDO
alma 2	-12,39	-0,053	0,65	272	0,05	<	1	VÁLIDO
alma 3	-249,47	0,053	-13,12	272	0,92	<	1	VÁLIDO
alma 4	-249,58	0,158	-39,38	272	0,92	<	1	VÁLIDO
ala inferior	-700,34	0,218	-152,46	763	0,92	<	1	VÁLIDO

Equilibrio

					ΣF , EM		0,01·E	
$V_{Ed} = \Sigma F_z$	404,00			-	V_{Ed} =	0,00	< 4,04	VÁLIDO
$N_{Ed} = \Sigma F_x$		0,00		-	N_{Ed} =	0,00	< 4,04	VÁLIDO
$M_{s,Ed} = \Sigma M$			-468,00	-	$M_{s,Ed}$ =	0,00	< 4,68	VÁLIDO

Aplastamiento de la chapa

TR fila 1:

$F_{t,Rd(chapa)}$	$\alpha k_1/2,5$	β_U	$F_{b,Rd}$	$F_{t,Ed}$	$F_{v,Ed}/F_{b,Rd}$			
774,9	0,44	0,99	342,46	47,69	0,14	<	1	VÁLIDO

TR fila 2:

$F_{t,Rd(chapa)}$	$\alpha k_1/2,5$	β_U	$F_{b,Rd}$	$F_{t,Ed}$	$F_{v,Ed}/F_{b,Rd}$			
774,9	0,91	0,99	702,9	47,72	0,07	<	1	VÁLIDO

TR grupo 3:

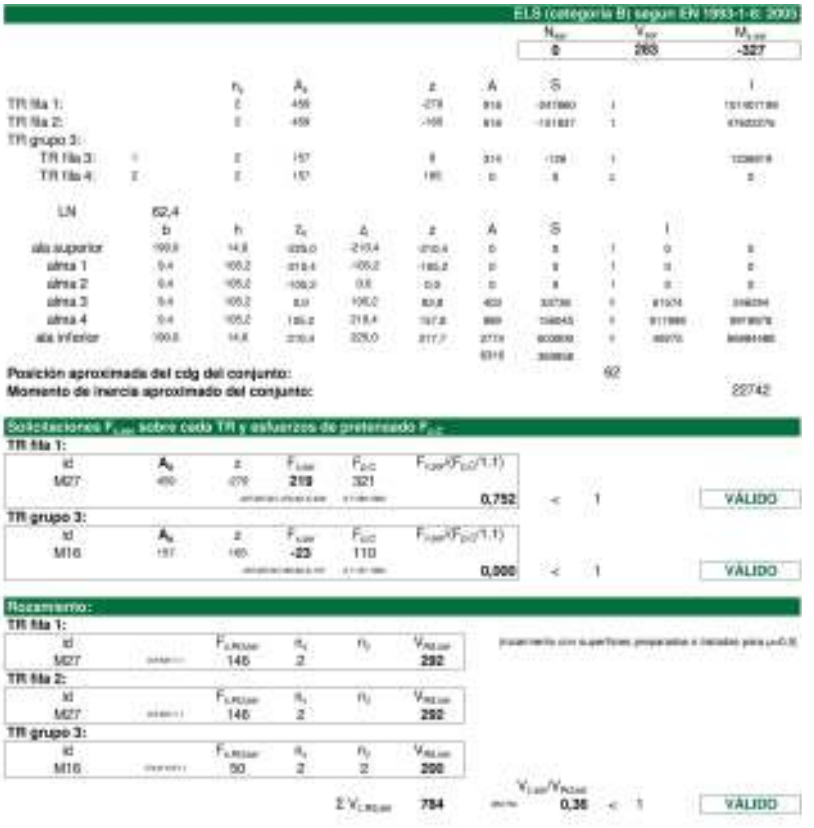
TR fila 3:

$F_{t,Rd(chapa)}$	$\alpha k_1/2,5$	β_U	$F_{b,Rd}$	$F_{t,Ed}$	$F_{v,Ed}/F_{b,Rd}$			
469,2	1,00	0,94	431,16	53,26	0,12	<	1	VÁLIDO

TR fila 4:

$F_{t,Rd(chapa)}$	$\alpha k_1/2,5$	β_U	$F_{b,Rd}$	$F_{t,Ed}$	$F_{v,Ed}/F_{b,Rd}$			
469,2	1,00	0,94	431,16	53,33	0,12	<	1	VÁLIDO

figura 13: Hoja FB particularizada para el diseño 3.2.1. Estado límite último



ELS (categoría B) según EN 1993-1-8: 2005

N_{Ed}	V_{Ed}	M_{Ed}
0	263	-327

		n_f	A_s	z	A	S		I
TR fila 1:		2	459	-279	918	[illegible]	1	[illegible]
TR fila 2:		2	459	-165	918	[illegible]	1	[illegible]
TR grupo 3:								
TR fila 3:	1	2	157	8	314	-128	1	[illegible]
TR fila 4:	2	2	157	165	0	0	2	0

LN	62,4									
	b	h	Z_G	Δ	z	A	S		I	
ala superior	190,0	14,8	325,0	-210,4	-210,4	0	0	1	0	0
alma 1	9,4	105,2	215,4	-105,2	-105,2	0	0	1	0	0
alma 2	9,4	105,2	105,2	0,0	0,0	0	0	1	0	0
alma 3	9,4	105,2	0,0	105,2	52,6	493	32736	1	81974	[illegible]
alma 4	9,4	105,2	105,2	215,4	157,8	889	140245	1	511986	[illegible]
ala inferior	190,0	14,8	210,4	325,0	217,7	2774	603800	1	66970	[illegible]
						6316	[illegible]			

Posición aproximada del cdg del conjunto: 62

Momento de inercia aproximado del conjunto: 22742

Solicitaciones $F_{t,Ed}$ sobre cada TR y esfuerzos de pretensado $F_{p,C}$

TR fila 1:

id	A_s	z	$F_{t,Ed}$	$F_{p,C}$	$F_{t,Ed}/(F_{p,C}/1,1)$			
M27	459	-279	219	321	0,752	<	1	VÁLIDO

TR grupo 3:

id	A_s	z	$F_{t,Ed}$	$F_{p,C}$	$F_{t,Ed}/(F_{p,C}/1,1)$			
M16	157	165	-23	110	0,000	<	1	VÁLIDO

Rozamiento:

TR fila 1:

id		$F_{s,Rd,ser}$	n_s	n_f	$V_{Rd,ser}$
M27	[illegible]	146	2		292

TR fila 2:

id		$F_{s,Rd,ser}$	n_s	n_f	$V_{Rd,ser}$
M27	[illegible]	146	2		292

TR grupo 3:

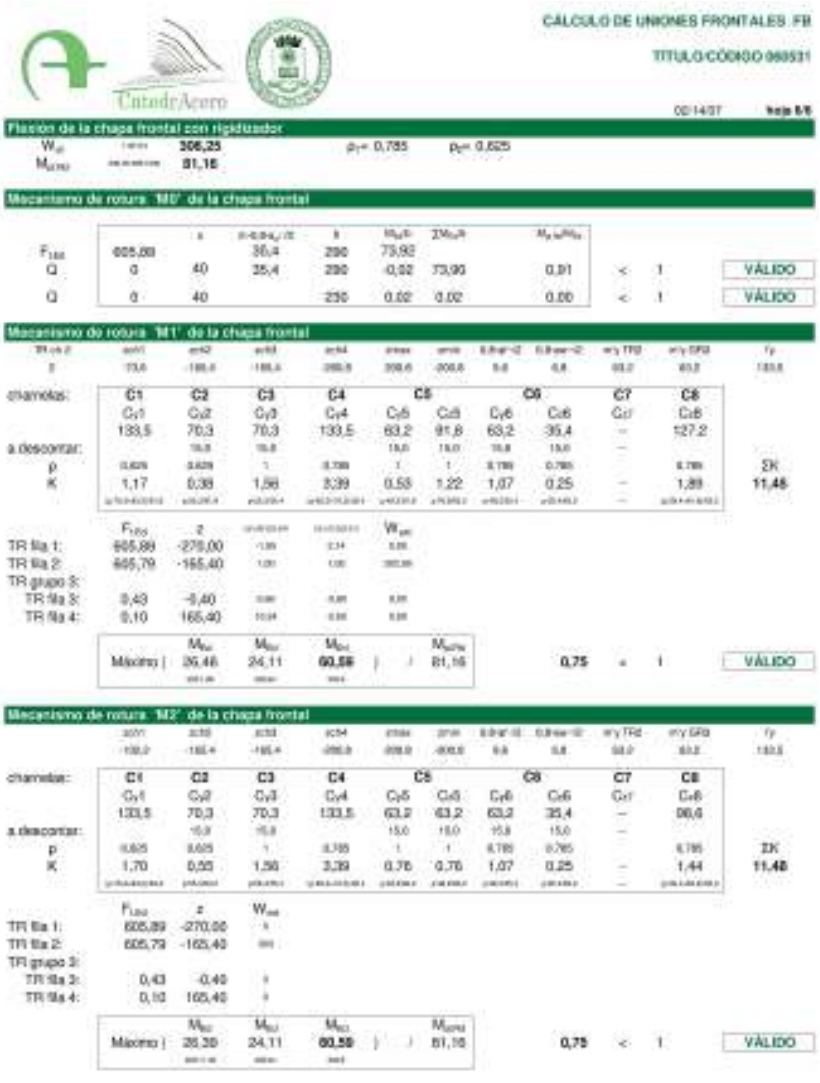
id		$F_{s,Rd,ser}$	n_s	n_f	$V_{Rd,ser}$
M16	[illegible]	50	2	2	200

[illegible] con superficies preparadas e [illegible] para μ=0,3

$\Sigma V_{s,Rd,ser}$ 784

$V_{Ed,ser}/V_{Rd,ser}$ 0,36 < 1 VÁLIDO

figura 14: Hoja FB particularizada para el diseño 3.2.1. Estado límite de servicio



CALCULO DE UNIONES FRONTALES FR

TITULO/CÓDIGO 060531

Flexión de la chapa frontal con rigidizador

W_{pl}	306,25	ρ_1= 0,785	ρ_2= 0,625
$M_{pl,Rd}$	81,16		

Mecanismo de rotura 'M0' de la chapa frontal

$F_{t,fc}$	605,89		35,4	250	73,92				
Q	0	40	35,4	250	-0,02	73,90	0,91	< 1	VÁLIDO
Q	0	40		250	0,02	0,02	0,00	< 1	VÁLIDO

Mecanismo de rotura 'M1' de la chapa frontal

	C1	C2	C3	C4	C5		C6		C7	C8	
chanelas:	C_{y1}	C_{y2}	C_{y3}	C_{y4}	C_{y5}	C_{z5}	C_{y6}	C_{z6}	C_{y7}	C_{z8}	
	133,5	70,3	70,3	133,5	63,2	91,8	63,2	35,4	–	127,2	
a descontar:		15,0	15,0		15,0	15,0	15,0	15,0	–		
ρ	0,625	0,625	1	0,785	1	1	0,785	0,785		0,785	ΣK
K	1,17	0,38	1,56	3,39	0,53	1,22	1,07	0,25	–	1,89	11,46

	$F_{t,fc}$	z	W_{pl}
TR fila 1:	605,89	-270,00	
TR fila 2:	605,79	-165,40	
TR grupo 3:			
TR fila 3:	0,43	-0,40	
TR fila 4:	0,10	165,40	

	$M_{pl,1}$	$M_{pl,2}$	$M_{pl,3}$		$M_{pl,Rd}$				
Máximo	35,46	24,11	60,59	)	81,16	0,75	<	1	VÁLIDO

Mecanismo de rotura 'M2' de la chapa frontal

	C1	C2	C3	C4	C5		C6		C7	C8	
chanelas:	C_{y1}	C_{y2}	C_{y3}	C_{y4}	C_{y5}	C_{z5}	C_{y6}	C_{z6}	C_{y7}	C_{z8}	
	133,5	70,3	70,3	133,5	63,2	63,2	63,2	35,4	–	98,6	
a descontar:		15,0	15,0		15,0	15,0	15,0	15,0	–		
ρ	0,625	0,625	1	0,785	1	1	0,785	0,785		0,785	ΣK
K	1,70	0,55	1,56	3,39	0,76	0,76	1,07	0,25	–	1,44	11,48

	$F_{t,fc}$	z	W_{pl}
TR fila 1:	605,89	-270,00	
TR fila 2:	605,79	-165,40	
TR grupo 3:			
TR fila 3:	0,43	-0,40	
TR fila 4:	0,10	165,40	

	$M_{pl,1}$	$M_{pl,2}$	$M_{pl,3}$		$M_{pl,Rd}$				
Máximo	35,30	24,11	60,59	)	81,16	0,75	<	1	VÁLIDO

figura 15: Hoja CHAPA particularizada para el diseño 3.2.1. Mecanismos de ruina M0, M1 y M2

figura 16: Hoja CHAPA particularizada para el diseño 3.2.1. Mecanismo de colapso M3

3.4 RECOMENDACIONES SOBRE CONTROL DE CALIDAD

Es usual en esta unión que las limitaciones por esfuerzo cortante en servicio disten mucho de alcanzarse, en cuyo caso se podrán relajar los criterios de aceptación o rechazo de coeficientes de rozamiento de las superficies en contacto (EAE, M.F. 2006: 58.7; CTE DB SE-A, M.V. 2006: 7.3.2; EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7; prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejoG). Las problemáticas especificaciones sobre el procedimiento de apriete de los tornillos no lo serán generalmente tanto en este tipo de unión. Sin embargo, a la vista de los resultados de las comprobaciones de estados límite de servicio, podrá ser necesario insistir sobre la homologación del procedimiento de apriete, en función del estado de suministro de tornillos y tuercas, e incluir el control in situ del estado real.

La resistencia de la chapa frontal normalmente en este tipo de uniones será crítica, por lo que frecuentemente será necesario adoptar chapas de espesores elevados. En tal caso convendrá especificar ensayos ultrasónicos complementarios de ausencia de "defecto de hoja" (cuestión que no deja de ser importante aun estando el espesor de las chapas "cosido" por los tornillos), así como procedimientos apropiados de soldadura del perfil a la chapa en taller.

Si es necesario disponer más de dos tornillos por fila las uniones anchas resultantes son relativamente susceptibles de desajustes de las superficies en contacto. Deberán especificarse con claridad en el proyecto las tolerancias de huelgos admitidos, y prever soluciones para posibles huelgos excesivos (dentro de un orden) cuando pudieran comprometer la seguridad y/o la durabilidad de la unión, por ejemplo mediante forros o "peines" (EAE, M.F., 2006: 76.7 y 80; prEN 1090-2:2006-10, artículo 8.1).

4 UNIONES ATORNILLADAS FRONTALES EN FLEXIÓN SIMPLE, TIPO F00B: ACOTADAS A CARA SUPERIOR DEL PERFIL.

4.1 DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN.

Este tipo de unión atornillada frontal resuelve las interferencias con otros elementos constructivos debidos al resalto de las uniones FB, el cual desaparece completamente en la unión F00B. Por lo tanto este tipo de unión es perfectamente aplicable para las vigas y viguetas de los forjados mixtos de chapa grecada. También resuelve adecuadamente las uniones en continuidad de correas que sustentan una cubierta de paneles tipo "deck".

La capacidad de la unión atornillada F00B es suficiente como para permitir su ubicación en las secciones de máxima solicitación de la pieza, es decir, en los puntos de apoyo extremos de cada vano, lo cual tiene el sentido obvio de facilitar al máximo los procesos de montaje y los plazos de ejecución in situ.

Evidentemente la realización soldada de uniones in situ en dichas ubicaciones es prácticamente incompatible con la aceleración imperante de los plazos de construcción, naturalmente cumpliendo los estándares normativos en materia de seguridad y control de ejecución, salvo que se renuncie al beneficio de la continuidad, con el consiguiente deterioro de los estados límite de deformación, vibraciones, etc., y/o con incrementos de cuantías de acero estructural realmente innecesarias con las uniones atornilladas aquí diseñadas.

Conviene llamar la atención sobre la preparación y condiciones marcadas para la soldadura superior de la chapa frontal. Si bien se trata de una soldadura de taller y por lo tanto, en principio, de fiabilidad adecuada, como afecta exactamente al borde de la chapa frontal y ésta típicamente excede el espesor de 15 mm señalado por el Eurocódigo 3 como caso de riesgo para fenómenos de desgarro laminar, es importante adoptar los detalles de soldadura "mejorados" recomendados por el propio Eurocódigo. A partir de determinados calibres y espesores, puede ser recomendable además una inspección ultrasónica específica de las chapas frontales (adicional a la inspección general del material base), cuando la responsabilidad de la unión así lo aconseje.

Nótese que a partir de determinados calibres de perfiles se incluyen en

la unión dos pequeñas cartelas, contraviniendo el principio actual de la construcción metálica de que tales elementos deben ser minimizados por su incidencia en los costes de fabricación. Pero sin dichas cartelas, en este tipo de unión las flexiones de las chapas frontales llegarían a ser prohibitivas para los grandes perfiles.

En los embrochamientos de vigas, para obviar la disposición de casquillos de nudo, etc., es conveniente crear un pequeño desnivel entre las cabezas superiores de las vigas principales y secundarias, de manera que el encuentro de estas últimas se produzca directamente contra el alma de las jácenas o vigas principales. De momento esta característica no aparece en el ejemplo seguidamente desarrollado, pero se introducirá en una variante posterior de este mismo tipo de unión atornillada.

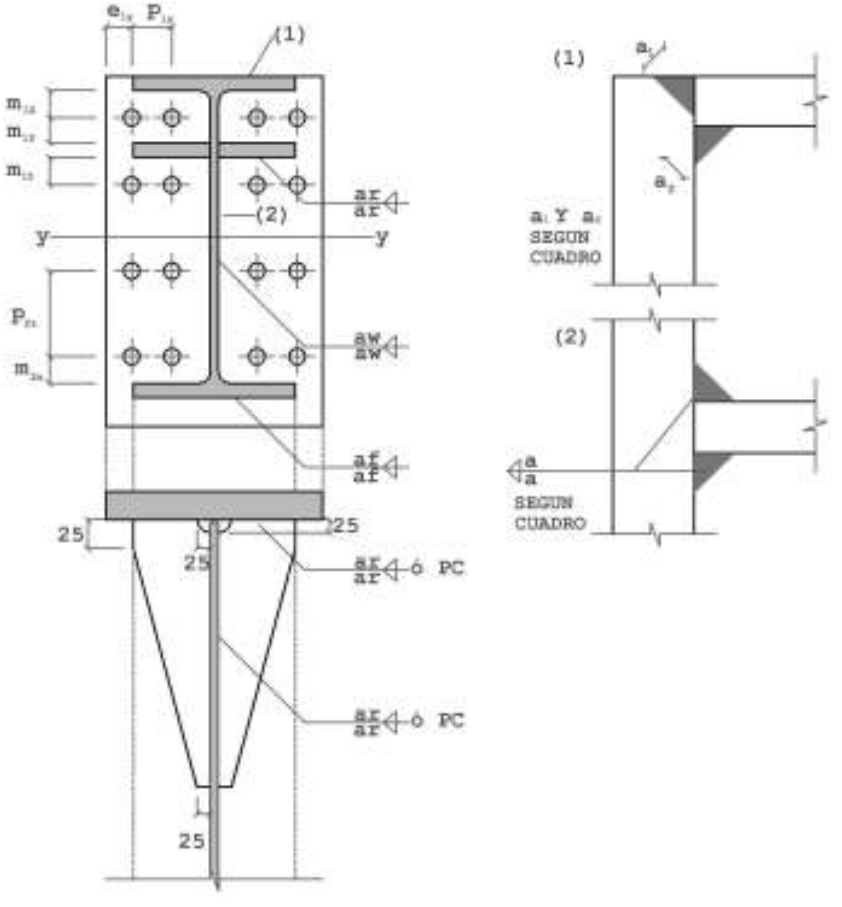


figura 17: Unión atornillada frontal. Disposición F00B

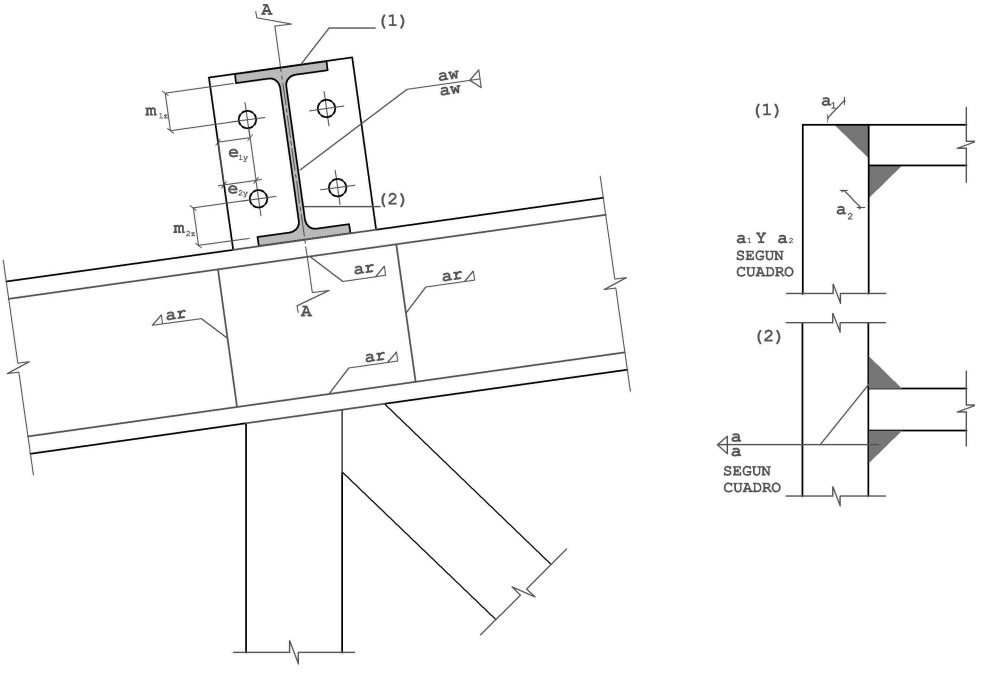


figura 18: Detalle de correa continua sobre cercha. Sección B-B

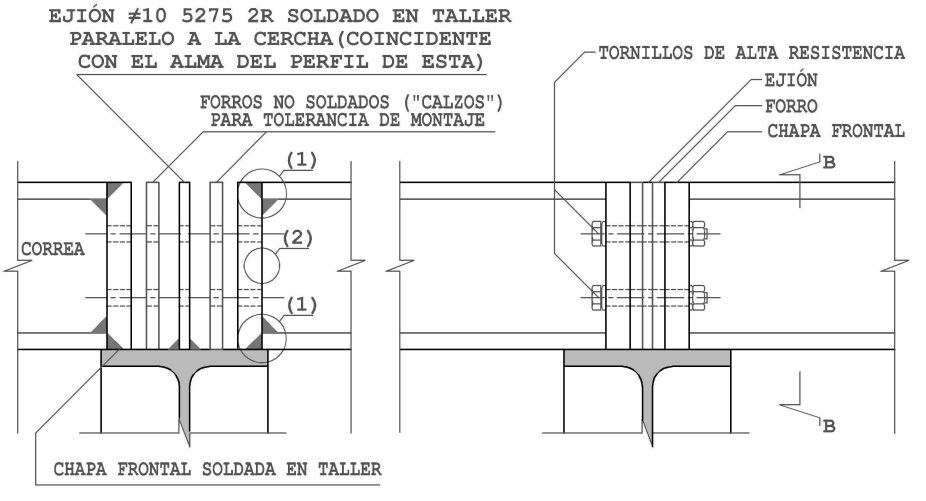


figura 19: Detalle de correa continua sobre cercha. Sección A-A

4.2 EJEMPLO NUMÉRICO DESARROLLADO.

En este apartado se desarrollan los cálculos para la unión particular que se describe a continuación. La mayoría de los comentarios a estos cálculos, comunes al resto de uniones que se estudian en otros capítulos, pueden encontrarse en el apartado 2.2.

F00B IPE 240 (S275). Nudos continuos

La unión se emplea para equilibrar el cortante y el momento negativo de extremo de la viga que tiene fuertemente impedida la rotación en el extremo enlazado. Es susceptible de empleo en el enlace de voladizos.

TORNILLOS			
A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1) Superficies preparadas y/o tratadas para $\mu \geq 0.5$ (EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejoG)			
El par de apriete para tornillos de alta resistencia (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento.			
Valores característicos (N/mm^2)		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 1000$	$f_{yb} = 900$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1.25$

Definición de la Unión: F00B IPE 240 (S275) Nudos continuos			
Chapa frontal S275JR Control ultrasónico específico según UNE 36100 y 7278 al grado B			Calzo/forro para tolerancia S275JR
#190·240·20 Soldaduras de alas ◣ 7, ◣ 7 Soldaduras de alma ◢◣ 4.			g ≤ 15 mm.
Tornillos superiores		**Tornillos inferiores**	
Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)	Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)
2M20 (taladros ϕ 22)	$e_y = 35$ $m_z = 32.5$	2M16 (taladros ϕ 18)	$e_y = 30$ $m_z = 30$
Ejión soldado en talles paralelo a la cercha coincidente con el alma del perfil de ésta S275JR			# 190·240·10 ◢◣ 6

F00B IPE 240 (S275). Nudos extremos sin continuidad.

La unión se emplea para la transmisión de la reacción vertical de extremo, sin momento, por unirse a una chapa –alma de viga, etc- sin rigidez rotacional, chapa que debe ser comprobada para la superposición de sus esfuerzos propios con los de la entrada de carga a través del enlace.

Aunque los cálculos de esta unión no se detallan (pueden reproducirse inmediatamente con el libro de cálculo F00B.xls facilitado), su interés se fundamenta en que en las vigas habituales las uniones sin continuidad son comunes en sus extremos.

TORNILLOS			
A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1) Superficies preparadas y/o tratadas para $\mu \geq 0.5$ (EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejoG)			
El par de apriete para tornillos de alta resistencia (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento.			
Valores característicos (N/mm^2)		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 1000$	$f_{yb} = 900$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1.25$

Definición de la Unión: **F00B IPE 240 (S275) Uniones extremas sin continuidad**			
Chapa frontal S275JR Control ultrasónico específico según UNE 36100 y 7278 al grado B			Calzo/forro para tolerancia S275JR
#190·240·10 Soldaduras de alas ◣ 5.5, ◣ 5.5 Soldaduras de alma ◢◣ 4.			g ≤ 15 mm.
Tornillos superiores		**Tornillos inferiores**	
Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)	Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)
2M16 (taladros ϕ 18)	$e_y = 30$ $m_z = 30$	2M16 (taladros ϕ 18)	$e_y = 30$ $m_z = 30$
Ejión soldado en talles paralelo a la cercha coincidente con el alma del perfil de ésta S275JR			# 180·240·10 ◢◣ 6

Capacidad resistente del perfil base en flexión simple (IPE240):

$V_{pl,Rd} = 1914\cdot(275/1.0)/\sqrt{3}$ N = 276 kN, $M_{pl,Rd} = 366600\cdot275/1.0$ N·mm = 101 kNm				
$V_{Rd} = V_{pl,Rd}\cdot(1+\sqrt{\rho})/2$ EN 1993-1-8:2005 6.2.8(3)	$\rho = 0$	$\rho = (1/3)^2$	$\rho = (2/3)^2$	$\rho = 1$
	$(1/2)V_{pl,Rd}$	$(2/3)V_{pl,Rd}$	$(5/6)V_{pl,Rd}$	$V_{pl,Rd}$
	152	203	253	304
$M_{V,Rd} = M_{pl,Rd} - \rho/4\cdot A_v^2\cdot f_{yd}/t_w$ EN 1993-1-8:2005 6.2.8(3)	$M_{pl,Rd}$	$M_{pl,Rd}$ – 5	$M_{pl,Rd}$ – 18	$M_{pl,Rd}$ – 41
	101	96	83	60

Solicitaciones nominales de la unión:

$V_{Ed} = (1/2)V_{pl,Rd}$ = 152 kN $M_{Ed} = -2/3\ M_{pl,Rd}$ = - 67.2 kNm

$\gamma_f = 1.4$

$V_{E,ser}$ = 108 kN $M_{E,ser}$ = - 48.0 kNm

ELU según EN 1993-1-8:2005

Cálculos preliminares:

▪ Reducción de $F_{v,Rd}$ por forros. Artículo 3.6.1 (12):

M20: $\beta_p = 9\cdot20/(8\cdot20+3\cdot15)$ $\beta_p = 0.878$

M16: $\beta_p = 9\cdot16/(8\cdot16+3\cdot15)$ $\beta_p = 0.832$

▪ Resistencias de cálculo de cada tornillo. Tabla 3.4

M20: $F_{t,Rd} = 0.9\cdot245\cdot1000/1.25$ N 176 kN

$F_{v,Rd} = 0.878\cdot0.6\cdot314\cdot1000/1.25$ N 133 kN

M16: $F_{t,Rd} = 0.9\cdot157\cdot1000/1.25$ N 113 kN

$F_{v,Rd} = 0.832\cdot0.6\cdot201\cdot1000/1.25$ N 80.3 kN

▪ Resistencia de TR solicitados a tracción y cortante: $F_{v,Ed}/F_{v,Rd}+F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd}\leq1$

M20: 38/133 + 176/(1.4·176) = 1

M16: 23/80.3 + 113/(1.4·113) = 1

Conjunto de la unión

Sin considerar rozamiento en la zona de compresión y distribuyendo las fuerzas en los tornillos con criterios plásticos:

	F_z (kN)	F_x (kN)	z (m)
TR fila 1ª	0↓	352→	-0.078↑
Eje de la pieza ----------			
TR fila 2ª	152.6↓	0	0.080
Zona de compresión	0	-29←	0.102↓
	0	-323←	0.115↓

V_{Rd} = $\Sigma F_z = 153$

N_{Rd} = $\Sigma F_x = 0$

M_{Rd} = $\Sigma F_x \cdot z = -67.5$ kNm

$|V_{Ed}/V_{Rd}|$ = **0.996 < 1**

$|M_{Ed}/M_{Rd}|$ = **0.996 < 1**

Chapa frontal:

▪ Flexión: EN 1993-1-8:2005 tabla 6.6.

$W_{pl} = b_p t_p^2/4$, $M_{pl,Rd} = W_{pl} f_{yd} = (1 \cdot 20^2/4) \cdot 265/1.0$ Nmm/mm = 26.5 kNmm/mm, donde se ha tomado el límite elástico garantizado según UNE-EN-10025 para chapas de S275JR con espesores entre 16 y 40 mm.

$M_{Ed} \approx$ max° (176/7.64, 176/4π) = 23.04 kNmm/mm; $M_{Ed}/M_{pl,Rd}$ = **0.869 < 1**

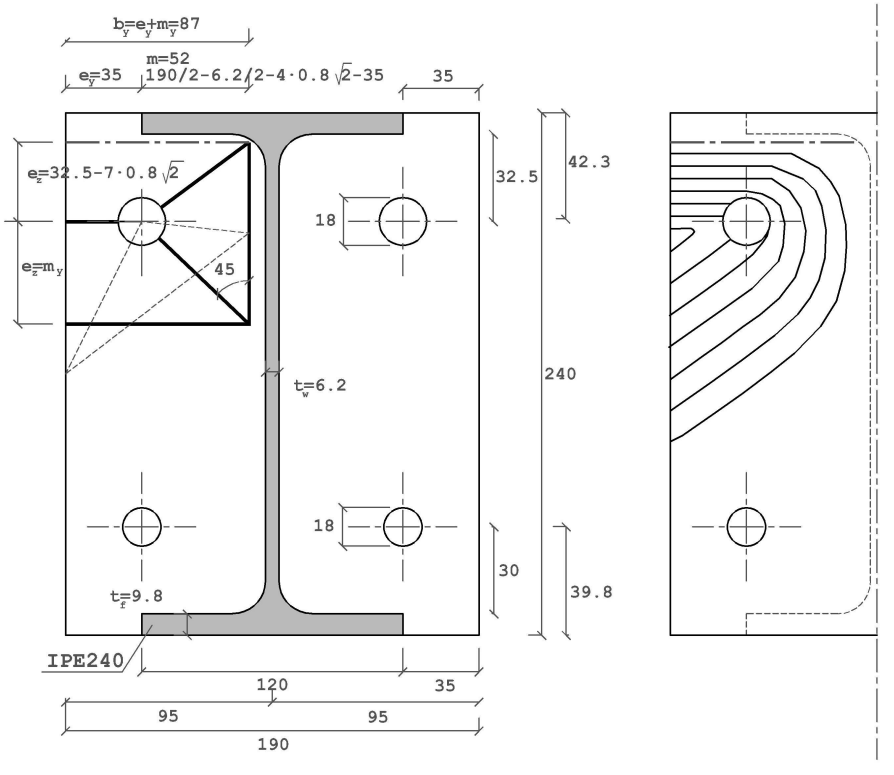


figura 20: Mecanismo de colapso de la chapa frontal

$\kappa = (b_y\text{-}d)/e_z + (2e_z\text{-}d/2)/m_y + \rho\cdot(2b_y\text{-}d)/c_z + \rho\cdot(2c_z\text{-}d/2)/m_y =$

$(65)/24.6 + (38.2)/52 + \rho\cdot(152)/52 + \rho\cdot(93)/52 =$ 7.64

$\rho = (1.25e_y+4m_y)/(2e_y+4m_y) = 0.906$

$W_{int} = M_{Ed} \cdot v \cdot \kappa$; $W_{ext} = F_{t,Rd} \cdot v$; $W_{int} = W_{ext} \Rightarrow M_{Ed} = F_{t,Rd}/\kappa$

El coeficiente ρ aplicado a los términos del trabajo virtual interno (W_{int}) relativos a la mitad inferior del mecanismo de colapso simplista supuesto (lineas gruesas en la figura), corrige dichos términos con respecto a los correspondientes a la configuración más desfavorable (charnelas representadas mediante lineas finas), coherente con las líneas de rotura del mecanismo implícito en la tabla 6.6 de EN 1993-1-8:2005. Obsérvese por otra parte que el no descontar los agujeros supondría en este caso un error en M_{Ed} del orden del 20%, que se puede considerar un orden de magnitud representativo para otros casos similares. En la parte derecha de la figura se ha representado el mecanismo de colapso "exacto" para las condiciones de contorno postuladas. Se ha calculado mediante un algoritmo numérico obteniéndose nuevamente κ =7.64 para una discretización de la chapa en ambas direcciones de 1mm.

En el eje superior de rotación se ha supuesto, conservadoramente, un apoyo simple, despreciando el momento de empotramiento parcial debido al ala del perfil. Esta hipótesis es plausible si, como en la unión que aquí se estudia, la capacidad del ala a flexión es sustancialmente inferior a la de la chapa frontal.

▪ Resistencia a aplastamiento de la chapa frontal ($F_{b,Rd}$).
Reducción de $F_{b,Rd}$ por "unión larga" según el artículo 3.8:

M20: $L_j = 157.9$	$< 15d = 360$	$\beta_{Lf} = 1$
M16: $L_j = 157.9$	$< 15d = 240$	$\beta_{Lf} = 1$

Cálculo de $F_{b,Rd}$ según tabla 3.4 suponiendo $k_1 = 2.5$:
M20: $\alpha = \min [44.8/(3\cdot22), 155.4/(3\cdot22)-1/4, 1000/410, 1] = 0.68$
$F_{b,Rd} = 0.68\cdot2.5\cdot1\cdot20\cdot20\cdot410/1.25$ N = 222 kN (más favorable que $F_{v,Rd}$)
M16: $\alpha = \min [39.8/(3\cdot18), 155.4/(3\cdot18)-1/4, 1000/410, 1] = 0.74$
$F_{b,Rd} = 0.74\cdot2.5\cdot1\cdot20\cdot16\cdot410/1.25$ N = 193 kN (más favorable que $F_{v,Rd}$)

ELS (categoría B) según EN 1993-1-8:2005

Pretensado y resistencia a deslizamiento. Artículos 3.6.1 y 3.9.1:

M20:	$F_{p,C} = 0.7\cdot245\cdot1000$ N =	172 kN
	$F_{s,Rd,ser} = 0.5\cdot0.7\cdot245\cdot1000/1.1$ =	78 kN
M16:	$F_{s,Rd,ser} = 0.5\cdot0.7\cdot157\cdot1000/1.1$ =	50 kN

Descompresión:

Se toma aproximadamente para la siguiente comprobación el brazo mecánico del cálculo en ELU:

Z = 67.2 kNm/352 kN =	0.191 m
N = M/Z = 48.0/0.191 =	251 kN
$N/2F_{p,Cd}$ = 251/(2·172/1.1) =	**0.803<1**

(Por lo tanto en servicio no se descomprime la unión)

Rozamiento:

Término de $F_{s,Rd,ser}$ debido a los TR superiores =	2·78 - μ M/Z
Término de $F_{s,Rd,ser}$ debido a los TR inferiores =	2·50 + μ M/Z
Conjunto de la unión_ ($V_{Rd,ser}$ independiente de M)	
$V_{Rd,ser}$ = (2·78 - μ M/Z)+(2·50 + μ M/Z)	256 kN
$\|V/V_{Rd,ser}\|$ = 108/256	**0.422<1**

(Por lo tanto en servicio no se producen deslizamientos).

4.3 EXPLICACIÓN DEL USO DEL LIBRO DE CÁLCULO DISPONIBLE EN http://catedracero.ee.upm.es, CON REFERENCIA AL MISMO EJEMPLO ANTERIOR.

4.3.1 Consideraciones generales

Para esta unión se distribuyen dos fichas distintas: F00B y F01B. En la apartado "descripción y utilización" (4.1) se indicaron las razones por la cuales a partir de determinados calibres de perfiles son necesarias en la unión dos pequeñas cartelas horizontales. La existencia o ausencia de estas cartelas no altera el estudio del conjunto de la unión, pero hace que los modos de colapso de la chapa frontal sean radicalmente distintos, lo que justifica las dos fichas independientes. En la unión estudiada en 4.2 no se disponen estas cartelas, por lo que su análisis debe realizarse con el libro de cálculo F00B.xls. Por el contrario son indispensables en la que se estudia posteriormente en 5.2.1 (fase metálica de una viga mixta), que debe comprobarse con el libro de cálculo F01B.xls.

El resto de las notas generales del apartado 2.3 son directamente aplicables a esta unión por lo que no se repiten.

4.3.2 Datos

La unión, siguiendo los criterios generales, se define en la hoja DATOS. Se caracteriza mediante dos grupos independientes de tornillos. El número de filas del grupo de tornillos superior puede variar de 1 hasta 3 y el del inferior de 1

hasta 5. Así se puede estudiar un número de uniones del tipo F00B suficientemente amplio con un único libro de cálculo. Como ejemplo, en el fichero F00B.xls disponible en www://catedracero.ee.upm.es cada grupo de tornillos tiene una sola fila con objeto de reproducir los cálculos del apartado 4.2. Por el contrario, en el fichero F01B.xls el primer grupo tiene una sola fila y el segundo tres para comprobar los cálculos del apartado 5.2.1

La figura siguiente es una imagen de la entrada de datos. Es obvio que los datos que se piden relativos a la cartela sólo son significativos para el fichero en el que se comprueba la chapa frontal acartelada. Sin embargo, se ha optado por mantenerlos en ambas fichas, con objeto de que la hoja DATOS sea idéntica en ambos ficheros. Esto permitirá, en un proceso de diseño, hacer fácilmente las dos comprobaciones "marcando" dicha hoja en uno de los ficheros y "pegándola" en el otro.

4.3.3 Resultados

Para cada fila de tornillos se comprueban explícitamente las condiciones de resistencia $F_{v,Ed}/F_{v,Rd} + F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd} \leq 1$ y $F_{t,Ed}/F_{t,Rd} \leq 1$. En los ficheros que se facilitan se ha implementado un algoritmo para mostrar únicamente la comprobación de las filas de tornillos activas.

Además de los tornillos se comprueba la sección comprimida del perfil base y las ecuaciones de equilibrio del conjunto.

El apartado "Fuerzas de palanca" de la hoja FB se ha suprimido pues obviamente los mecanismos de colapso de la chapa frontal estudiados en 3.2 (modos 1, 2 y 3 de EN 1993-1-8:2005 tabla 6.2) aquí no son posibles.

Las comprobaciones del ELS son equivalentes a las comentadas para la unión FB. Se resalta únicamente el buen acuerdo que existe entre la solución manual aproximada propuesta en 4.2 para comprobar la descompresión de la unión y la también aproximada pero independiente de la anterior incluida en los ficheros (se recuerda que en algunas ocasiones –frecuentemente si se interrumpen los cálculos sin haber concluido- las celdas con referencias cruzadas que se utilizan para realizar esta comprobación dan lugar a un error. El modo de subsanarlo ya se describió en 2.3.2).

La chapa frontal se comprueba en la hoja CHAPA. Esta hoja es distinta en los dos libros de cálculo por las razones indicadas al comienzo de esta sección. Los mecanismos que se estudian se han nombrado M0, M1, M2 y M3. Aquí se describirán los modos M1, M2 y M3 que son los únicos posibles en la

unión sin cartelas. El mecanismo M0 se analiza en el apartado 5.2, donde se comprueba una unión F01B con cartelas.

El mecanismo M2 es un modelo sencillo del propuesto en la tabla 6.6 de EN 1993-1-8:2005, en el cual las charnelas C1 y C2 (ver figura de la hoja de cálculo) son horizontales. El coeficiente ρ aplicado a varios términos del trabajo virtual interno (W_{int}) los calibra respecto a los correspondientes en la configuración de charnelas implícitas en EN 1993-1-8:2005, de acuerdo con la justificación expuesta en el apartado 4.2. No se prejuzga la posición de la charnela C2, que se sitúa sucesivamente sobre cada fila de tornillos eligiéndose el mecanismo más desfavorable. Cuando C2 se encuentra sobre la fila superior de tornillos (superponiéndose a C3) el mecanismo estudiado coincide con el analizado en la sección 4.2. Obviamente es el mecanismo más desfavorable para el diseño con sólo dos filas de tornillos aquí estudiado. Las diferencias en el valor de κ que se obtienen en el cálculo manual y el automático (7.64 frente a 7.69) se deben a que se usan criterios ligeramente distintos para definir el coeficiente ρ. Es fácil verificar que haciendo ρ = 1 se obtiene exactamente el mismo κ (8.01) en ambos cálculos. Este resultado permite calibrar que la incidencia de estos términos en el computo de κ es del orden de un 4.2% ((8.01-7.69)/7.69·100), valor que disminuye rápidamente si el número de filas de tornillos involucradas en el modo de fallo crece. Otra diferencia entre los cálculos manual y automático es el modo en que se estima el trabajo externo. En el primer caso se hace con el valor de $F_{t,Rd}$, mientras que en segundo se usa el valor de la fuerza F_x obtenida en el cálculo. Para el diseño analizado la diferencia puede ser ínfima, pero en mecanismos en los que intervienen varias filas de tornillos esta variación puede permitir validar un diseño..

Además del mecanismo propuesto en EN 1993-1-8:2005, se estudia el clásico modo de colapso en forma de sobre (mecanismo M1). La dificultad de este mecanismo es que a priori no se sabe la posición de las charnelas C2 y C1, para lo cual se ha implementado una función, someramente descrita 2.3.2, que de forma aproximada estima su configuración pésima. Como en el mecanismo M2 las charnelas anteriores se suponen horizontales. De nuevo el coeficiente ρ aplicado a diversos términos del trabajo virtual interno (W_{int}) los corrige con respecto a los homólogos en la configuración de charnelas más realista indicada en EN-1993-1-8:2005.

La diferencia en el valor de M_{Ed} que se obtiene para los mecanismos M1 y M2 en el nudo que se analiza no justifica su estudio por separado. Sin embargo, no es difícil encontrar diseños en los cuales los mecanismos en forma

de sobre son significativamente más desfavorables que el mecanismo M2 propuesto en la tabla 6.6 de EN 1993-1-8:2005, razón por la cual se comprueban ambos en cualquier caso.

En el último mecanismo estudiado, M3, se forma una charnela vertical a cada lado del perfil base. Este mecanismo sólo será posible en uniones con un gran número de tornillos por fila, de forma que algunos sobrepasen el límite definido por la línea que une los extremos de las alas del. Para las uniones consideradas en este capítulo, el tercero y el quinto esta situación es poco usual, pero no ocurre así para las que se estudian en los últimos capítulos, especialmente en secciones muy solicitadas.

Pero la discrepancia fundamental entre el cálculo propuesto en el apartado 4.2 y el de las hojas de cálculo es que en estas últimas para todos los tornillos se hacen las dos comprobaciones siguientes

$M_{Ed} \approx \max(F_{t,Ed}/4\pi$ en int, $F_{t,Ed}/5$ en zonas voladas)

En el apartado 4.2 la última comprobación se ha omitido, pues no existen zonas voladas en la chapa frontal y sin embargo resulta (indebidamente) condicionante con los datos numéricos del ejemplo. Es responsabilidad del usuario de las hojas de cálculo decidir si las expresiones programadas se adecuan al diseño del nudo que estudia, asumirlas si lo considera oportuno, o modificarlas según su propio criterio.

Las siguientes figuras son varias hojas del libro de cálculo comentado particularizado para el diseño del apartado 4.2.

CÁLCULO DE UNIONES FRONTALES F008

TÍTULO/CÓDIGO 060531

03/14/07 hoja 2/6

Solicitaciones de primer orden:

N_{Ed}	V_{Ed}	$M_{y,Ed}$
0	152	-67,2

Segundo orden:

X	1/X-1	(1/X-1)W/A	N_b
1	0,00	0	0

Solicitaciones totales:

N_{Ed}	$V_{z,Ed}$	$M_{y,Ed}$	γ_{mod}	$N_{b,Ed}$	$V_{b,Ed}$	$M_{b,Ed}$
0	152	-67,2	1,4	0	106,6	-46,9

Perfiles:

Acero:

id	f_y	f_u	γ_M	f_{yd}
S275	275	410	1	275

Soldaduras:

a_f	a_w
7	5

Refuerzo:

t	z
25	150

Perfil base:

id	h	b	A	A_{vz}	$W_{pl,y}$	t_f	t_w	r	h_i	h_0
IPE240	240	120	39,12	19,14	366,6	9,8	6,2	15	220	308,71

Chapa frontal

Acero:

id	f_y	f_u	γ_M	f_{yd}
S275	265	410	1	265

Geometría:

b	h	t	g	μ
190	240	20	15	2,5

TR

Acero TR:

id	f_y	f_u	γ_{M0}	$\gamma_{M0,ser}$
A10.9	900	1000	1,25	1,1

TR grupo 1:

id	d	d_0	A_s	A	$F_{t,Rd}$	F_{t,Rd^*}	β_p	$F_{v,Rd}$	$F_{b,Rd}$	$F_{b,Rd,ser}$	$F_{b,Rd,ser}$
M20	20	22	245	314	178	151	0,85	133	172	78,2	328

TR grupo 2:

id	d	d_0	A_s	A	$F_{t,Rd}$	F_{t,Rd^*}	β_p	$F_{v,Rd}$	$F_{b,Rd}$	$F_{b,Rd,ser}$	$F_{b,Rd,ser}$
M16	16	18	157	201	113	96,5	0,83	80,3	110	50	262

Distancias:

TR grupo 1:

id	n_x	e_x	β_1	m_x	e_y	e_1	β_1	m_y	p_{crit}	Chk $\Sigma(e_y, p_y)$	z
M20	2	35	–	57	1	42,3	0	32,5	157,9	–	-77,7

TR grupo 2:

id	n_x	e_x	β_1	m_x	e_y	e_1	β_1	m_y	p_{crit}		z
M16	2	30	–	62	1	38,8	0	30	157,9	–	80,2

Perfil base:

id	z_{sup}	z_{int}	z_{inf}
IPE240	0	0	120

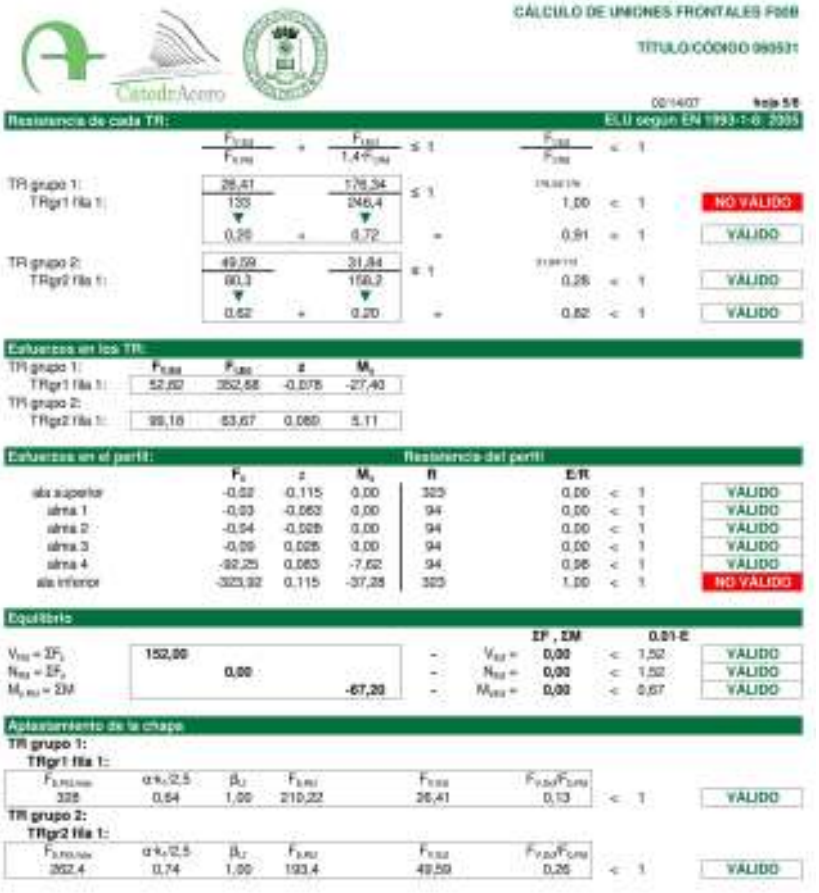
Chk $\Sigma(e_y, p_y)$

–

Discretización del perfil base:

	b	h	z	f_y	fl
ala superior	120	9,8	-115,1	275	323
alma 1	6,2	55,1	-82,6	275	94
alma 2	6,2	55,1	-27,5	275	94
alma 3	6,2	55,1	27,5	275	94
alma 4	6,2	55,1	82,6	275	94
ala inferior	120	9,8	115,1	275	323

figura 21: Hoja DATOS particularizada para el diseño 4.2.1



CÁLCULO DE UNIONES FRONTALES F08B

TITULO CÓDIGO 090531

00/14/07 hoja 5/8

Resistencia de cada TR: ELU según EN 1993-1-8: 2005

	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}$	+	$\frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}}$	≤ 1	$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}}$	<	1		
TR grupo 1:	26,41		176,34						
TRgr1 fila 1:	133		246,4	≤ 1	1,00	<	1		NO VÁLIDO
	▼		▼						
	0,20	+	0,72	=	0,91	<	1		VÁLIDO
TR grupo 2:	49,59		31,84						
TRgr2 fila 1:	80,3		159,2	≤ 1	0,26	<	1		VÁLIDO
	▼		▼						
	0,62	+	0,20	=	0,82	<	1		VÁLIDO

Esfuerzos en los TR:

	$F_{v,Ed}$	$F_{t,Ed}$	z	M_y
TR grupo 1:				
TRgr1 fila 1:	52,60	352,68	-0,078	-27,40
TR grupo 2:				
TRgr2 fila 1:	99,18	63,67	0,080	5,11

Esfuerzos en el perfil: **Resistencia del perfil**

	F_x	z	M_y	n	E/R			
ala superior	-0,02	0,115	0,00	323	0,00	<	1	VÁLIDO
alma 1	-0,03	-0,063	0,00	94	0,00	<	1	VÁLIDO
alma 2	-0,04	-0,028	0,00	94	0,00	<	1	VÁLIDO
alma 3	-0,09	0,028	0,00	94	0,00	<	1	VÁLIDO
alma 4	-92,25	0,063	-7,62	94	0,08	<	1	VÁLIDO
ala inferior	-323,92	0,115	-37,28	323	1,00	<	1	NO VÁLIDO

Equilibrio

					ΣF , ΣM		0,01·E	
$V_{Ed} = \Sigma F_z$	152,00			-	V_{Ed} =	0,00	< 1,52	VÁLIDO
$N_{Ed} = \Sigma F_x$		0,00		-	N_{Ed} =	0,00	< 1,52	VÁLIDO
$M_{y,Ed} = \Sigma M$			-67,20	-	M_{Ed} =	0,00	< 0,67	VÁLIDO

Aplastamiento de la chapa

TR grupo 1:

TRgr1 fila 1:

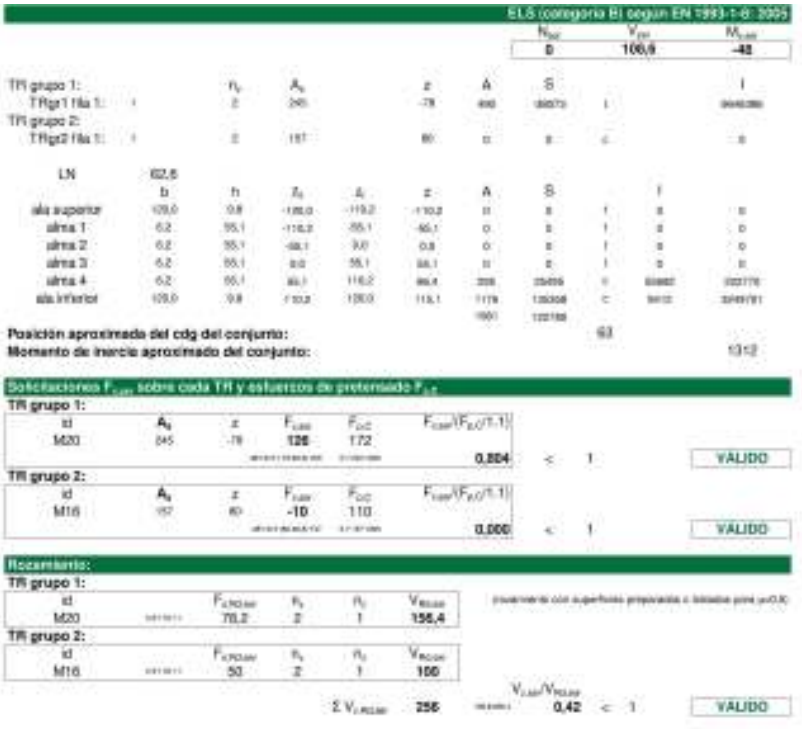
$F_{b,Rd,min}$	$\alpha \cdot k_1/2,5$	β_U	$F_{b,Rd}$	$F_{v,Ed}$	$F_{v,Ed}/F_{b,Rd}$			
328	0,64	1,00	210,22	26,41	0,13	<	1	VÁLIDO

TR grupo 2:

TRgr2 fila 1:

$F_{b,Rd,min}$	$\alpha \cdot k_1/2,5$	β_U	$F_{b,Rd}$	$F_{v,Ed}$	$F_{v,Ed}/F_{b,Rd}$			
262,4	0,74	1,00	193,4	49,59	0,26	<	1	VÁLIDO

figura 22: Hoja FB particularizada para el diseño 4.2.1. Estado límite último



ELS (categoría B) según EN 1993-1-8: 2005

N_{Ed}	V_{Ed}	M_{Ed}
0	100,0	-42

TR grupo 1:

		n_v	A_s	z	A	S		I
TRgr1 fila 1:	1	2	245	-78	[illegible]	[illegible]	1	[illegible]

TR grupo 2:

TRgr2 fila 1:	1	2	157	80	0	0	0	0

LN 62,6

	b	h	Z_G	Z_i	z	A	S		I	
ala superior	120,0	0,8	-126,0	-119,2	-119,2	0	0	1	0	0
alma 1	6,2	55,1	-116,2	-55,1	-55,1	0	0	1	0	0
alma 2	6,2	55,1	-55,1	0,0	0,0	0	0	1	0	0
alma 3	6,2	55,1	0,0	55,1	55,1	0	0	1	0	0
alma 4	6,2	55,1	55,1	116,2	55,1	206	[illegible]	0	[illegible]	[illegible]
ala inferior	120,0	0,8	119,2	120,0	119,1	1179	[illegible]	0	[illegible]	[illegible]
						1900	[illegible]	0		

Posición aproximada del cdg del conjunto: 63

Momento de inercia aproximado del conjunto: 1312

Solicitaciones $F_{v,Ed}$ sobre cada TR y esfuerzos de pretensado $F_{p,C}$

TR grupo 1:

id	A_s	z	$F_{v,Ed}$	$F_{p,C}$	$F_{v,Ed}/(F_{p,C}/1,1)$			
M20	245	-78	126	172				
					0,804	<	1	VÁLIDO

TR grupo 2:

id	A_s	z	$F_{v,Ed}$	$F_{p,C}$	$F_{v,Ed}/(F_{p,C}/1,1)$			
M16	157	80	-10	110				
					0,000	<	1	VÁLIDO

Rozamiento:

TR grupo 1:

id		$F_{v,Rd,lim}$	k_s	n_s	$V_{Rd,lim}$
M20	[illegible]	78,2	2	1	156,4

(rozamiento con superficies preparadas o lisiadas pinta μ=0,3)

TR grupo 2:

id		$F_{v,Rd,lim}$	k_s	n_s	$V_{Rd,lim}$
M16	[illegible]	50	2	1	100

$\Sigma V_{v,Rd,lim}$ 256 $V_{v,Ed}/V_{Rd,lim}$ 0,42 < 1 VÁLIDO

figura 23: Hoja FB particularizada para el diseño 4.2.1. Estado límite de servicio

4.4 RECOMENDACIONES SOBRE CONTROL DE CALIDAD

Es usual en esta unión que las limitaciones por esfuerzo cortante en servicio disten mucho de alcanzarse, en cuyo caso se podrán relajar los criterios de aceptación o rechazo de coeficientes de rozamiento de las superficies en contacto (EAE, M.F. 2006: 58.7; CTE DB SE-A, M.V. 2006: 7.3.2; EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7; prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejoG). Las problemáticas especificaciones sobre el procedimiento de apriete de los tornillos no lo serán generalmente tanto en este tipo de unión. Sin embargo, a la vista de los resultados de las diversas comprobaciones de estados límite de servicio, podrá ser necesario insistir sobre la homologación del procedimiento de apriete, en función del estado de suministro de tornillos y tuercas, e incluir el control in situ del estado real.

La resistencia de la chapa frontal normalmente en este tipo de uniones será crítica, por lo que frecuentemente será necesario adoptar chapas de espesores elevados. En tal caso convendrá especificar ensayos ultrasónicos complementarios de ausencia de "defecto de hoja" (cuestión que no deja de ser importante aun estando el espesor de las chapas "cosido" por los tornillos), así como procedimientos apropiados de soldadura del perfil a la chapa en taller.

Si es necesario disponer más de dos tornillos por fila las uniones anchas resultantes son relativamente susceptibles de desajustes de las superficies en contacto. Deberán especificarse las tolerancias de huelgos admitidos, y prever soluciones para posibles huelgos excesivos (dentro de un orden) cuando pudieran comprometer la seguridad y/o la durabilidad de la unión, por ejemplo mediante forros o "peines" incluidos a posteriori (EAE, M.F., 2006: 76.7 y 80; prEN 1090-2:2006-10, artículo 8.1).

Se recomienda la preparación de bordes representada en los detalles de soldadura del ala superior del perfil a la chapa frontal. Su fundamentación puede consultarse en EAE, M.F. 2006: artículo 59.6 y en antigua UNE-ENV 1993-1-1, AENOR Dic.96: artículo 6.6.3 (3) y figura.6.6.5.a.

5 UNIONES ATORNILLADAS FRONTALES EN FLEXIÓN SIMPLE, TIPO F00BC: PARA VIGAS MIXTAS.

5.1 DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN.

En edificación la acción mixta se consigue simplemente por conexión de la sección metálica al hormigón de los forjados de piso, ya sean de chapa grecada colaborante, losas macizas o aligeradas, etc.

En el capítulo precedente se consideraba el caso de una cubierta ligera, y por lo tanto las solicitaciones eran de orden de magnitud inferior a las que se producen típicamente en piezas más cargadas que reciben forjados de piso. Esto, ya de por sí, crea diferencias importantes en las uniones correspondientes, pero además existen otras diferencias de índole tanto cualitativo como cuantitativo, derivadas de las particulares características de las piezas mixtas.

Por ejemplo, en las uniones de las vigas mixtas la proporción del esfuerzo cortante en relación al cortante último del perfil es generalmente mucho más elevada que en las vigas metálicas puras, y por defecto debería presuponerse igual a la unidad.

Otra circunstancia específica de las uniones de vigas mixtas es que la continuidad de las solicitaciones de tracción puede conseguirse (hasta cierto punto) "sólo mediante armadura pasiva" (sin considerar elementos de unión traccionados en la sección metálica), pero a costa obviamente de un incremento de dicha unidad de obra, así como de la densidad de conectadores necesarios entre perfil y forjado, todo lo cual tiene no sólo repercusiones económicas sino también constructivas: especialmente, en los forjados mixtos de chapa grecada colaborante, los espesores de hormigón suelen ser demasiado pequeños como para alojar grandes cantidades de armadura, y para absorber, incluso adecuadamente armados, esfuerzos rasantes de transferencia de solicitaciones de conexión anómalamente importantes.

Como dar continuidad "sólo mediante armadura pasiva" conlleva una obvia infrautilización de la capacidad del perfil que en cualquier caso hay que poner en obra, en los cálculos siguientes no se ha considerado dicha posibilidad, y por ello se adoptan cocientes elevados entre el momento parcial canalizado por el perfil y su momento último, lo cual, unido al elevado valor

relativo del esfuerzo cortante ya mencionado, determina que en esta variante de uniones atornilladas puedan llegar a concurrir fuertes solicitaciones.

Por otra parte, una prestación generalmente requerida de las soluciones mixtas es su carácter autoportante, lo cual determina que en la fase constructiva "la sección metálica sola" deba hacer frente a la totalidad de las acciones de su peso propio y del forjado, más una cierta sobrecarga, lo que constituye otra razón fundamental para que las uniones de la sección metálica se dimensionen para una fracción importante de las solicitaciones finales, con plena continuidad entre los vanos consecutivos de las piezas metálicas.

En otro orden de cosas, según se indicó ya anteriormente, para minimizar la disposición de casquillos de nudo, etc., puede ser conveniente crear un pequeño desnivel entre las cabezas superiores de las vigas principales y secundarias, pero ambas deben quedar conectadas al forjado para conseguir la correspondiente acción mixta.

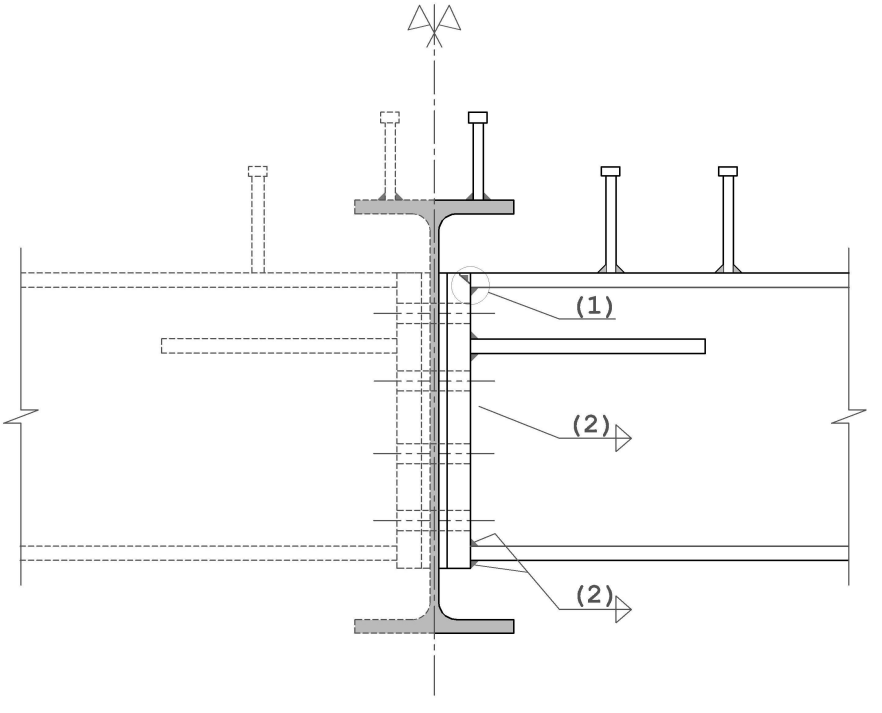


figura 24: atornillada frontal. Disposición F00BC

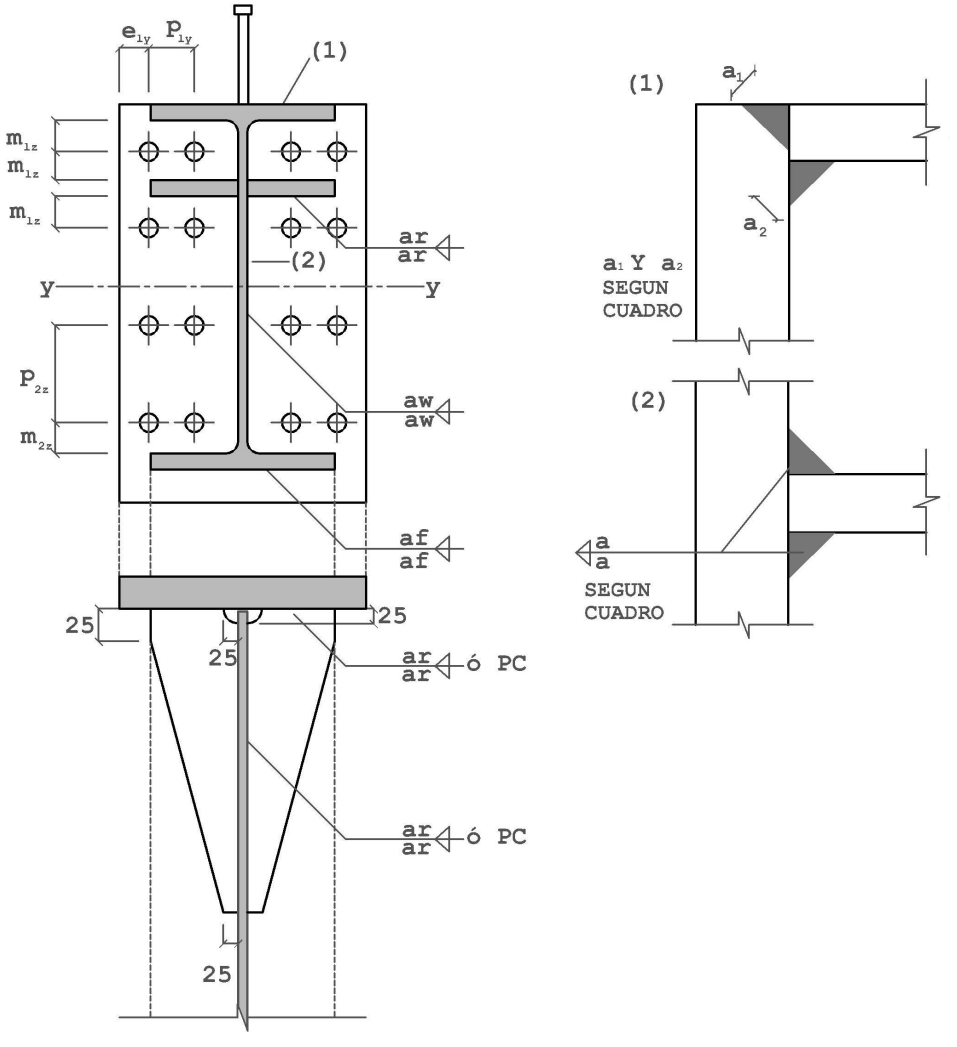


figura 25: Unión atornillada frontal. Disposición F00BC.

5.2 EJEMPLO NUMÉRICO DESARROLLADO.

En este apartado se desarrollan los cálculos para la unión que se describe a continuación, los comentarios a estos cálculos se encuentran en el apartado 2.2

F00BC HEB 600 (S275). Nudos continuos

La unión se emplea para equilibrar el cortante y el momento negativo de extremo de las vigas que tienen fuertemente impedida la rotación en el extremo enlazado. Es susceptible de empleo en el enlace de voladizos.

TORNILLOS			
A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1) Superficies preparadas y/o tratadas para $\mu \geq 0.5$ (EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejoG)			
El par de apriete para tornillos de alta resistencia (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento.			
Valores característicos (N/mm^2)		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 1000$	$f_{yb} = 900$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1.25$

Definición de la Unión: F00BC HEB 600 (S275) Nudos continuos			
Chapa frontal S275JR Control ultrasónico específico según UNE 36100 y 7278 al grado B			Calzo/forro para tolerancia S275JR
# 400·650·35 Ala superior: Dos opciones equivalentes: PP 18 + ◣ 18; o PC Alma ◢◣ 10 ala inferior ◢◣ 18			$g \leq 15$ mm.
Tornillos superiores		**Tornillos inferiores**	
Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)	Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)
4M27 4M27 (taladros ϕ 30)	$e_y = 42$ $p_y = 90$ $m_z = 45$ $p_z = 150$	4M20 4M20 (taladros ϕ 22)	$e_y = 42$ $p_y = 90$ $m_z = 45$ $p_z = 150$
Cartelas S275JR cortadas según detalle Alma perfil: ◢◣ 10 Chapa frontal: Dos opciones equivalentes: ◢◣ 18 ; o PC			# 25·180·400

F00BC HEB 600 (S275). Nudos extremos sin continuidad.

La unión se emplea para la transmisión de la reacción vertical de extremo, sin momento, por unirse a una chapa –alma de viga, etc- sin rigidez rotacional, chapa que debe ser comprobada para la superposición de sus esfuerzos propios con los de la entrada de carga a través del enlace.

Aunque los cálculos de esta unión no se detallan (pueden reproducirse inmediatamente con los libros de cálculo F00B.xls y F00BC.xls facilitados), su interés se fundamenta en que en las vigas habituales las uniones sin continuidad son comunes en sus extremos. Nótese que en este diseño se prescinde de las cartelas horizontales.

TORNILLOS			
A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1) Superficies preparadas y/o tratadas para $\mu \geq 0.5$ (EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejoG)			
El par de apriete para tornillos de alta resistencia (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento.			
Valores característicos (N/mm^2)		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 1000$	$f_{yb} = 900$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1.25$

Definición de la Unión: F00BC HEB 600 (S275) Uniones extremas sin continuidad			
Chapa frontal S275JR Control ultrasónico específico según UNE 36100 y 7278 al grado B			Calzo/forro para tolerancia S275JR
# 300·650·25 Alas y alma ◢◣ 10			g ≤ 15 mm.
Tornillos superiores		**Tornillos inferiores**	
Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)	Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)
2M27 2M27 (taladros ϕ 30)	$e_y = 42$ $m_z = 60$ $p_z = 145$	2M20 2M20 (taladros ϕ 22)	$e_y = 42$ $m_z = 50$ $p_z = 142$

Capacidad resistente del perfil base en flexión (HEB600)

$V_{pl,Rd}$ = 11080·275/1.0/√3N = 1759kN, $M_{pl,Rd}$ = 6425000·275/1.0 Nmm = 1767kNm				
V_{Rd} =	$\rho = 0$	$\rho = (1/3)^2$	$\rho = (2/3)^2$	$\rho = 1$
$V_{pl,Rd}\cdot(1+\sqrt{\rho})/2$	$(1/2)V_{pl,Rd}$	$(2/3)V_{pl,Rd}$	$(5/6)V_{pl,Rd}$	$V_{pl,Rd}$
EN 1993-1-8:2005 6.2.8(3)	880	1173	1466	1759
$M_{V,Rd} = M_{pl,Rd} - \rho/4\cdot A_v^2\cdot f_{yd}/t_w$	$M_{pl,Rd}$	$M_{pl,Rd}$ – 61	$M_{pl,Rd}$ – 242	$M_{pl,Rd}$ – 545
EN 1993-1-8:2005 6.2.8(3)	1767	1706	1525	1222

Solicitaciones nominales de la unión:

$V_{Ed} = V_{pl,Rd}$ = 1759 kN $M_{Ed} = -(2/3)M_{pl,Rd}$ - 1178 kNm

$\gamma_f = 1.4$

$V_{E,ser}$ = 1257 kN $M_{E,ser}$ = - 841 kNm

5.2.1 Situación de proyecto 1: Estructura metálica "pura".

ELU según EN 1993-1-8

Cálculos preliminares:

▪ Reducción de $F_{v,Rd}$ por forros. Artículo 3.6.1 (12):

M27: $\beta_p = 9\cdot27/(8\cdot27+3\cdot15)$ $\beta_p = 0.931$

M20: $\beta_p = 9\cdot20/(8\cdot20+3\cdot15)$ $\beta_p = 0.878$

▪ Resistencias de cálculo de cada tornillo: Tabla 3.4:

M27: $F_{t,Rd} = 0.9\cdot459\cdot1000/1.25$ N 330 kN

$F_{v,Rd} = 0.931\cdot0.6\cdot573\cdot1000/1.25$ N 256 kN

M20: $F_{t,Rd} = 0.9\cdot245\cdot1000/1.25$ N 176 kN

$F_{v,Rd} = 0.878\cdot0.6\cdot314\cdot1000/1.25$ N 133 kN

▪ Resistencia de TR solicitados a tracción y cortante: $F_{v,Ed}/F_{v,Rd}+F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd}\leq1$

M27: 73/256 + 330/(1.4·330) = 1

81/256 + 316/(1.4·330) = 1

M20: 38/133 + 176/(1.4·176) = 1

Conjunto de la unión

Sin considerar rozamiento en la zona de compresión y distribuyendo las fuerzas en los tornillos con criterios plásticos:

	F_z (kN)	F_x (kN)	z (m)
TR fila (1)	292↓	1320→	-0.225↑
TR fila (2)	324↓	1264→	-0.075↑
Eje de la pieza ----------			
TR fila (3)	532↓	0	
TR fila (4)	532↓	0	
Zona de compresión	0	-109←	0.257↓
	0	-2475←	0.285↓
V_{Rd} =	$\Sigma F_z = 1680$		
N_{Rd} =		$\Sigma F_x = 0$	
M_{Rd} =			$\Sigma F_x \cdot z = -1125$kNm
$\lvert V_{Ed}/V_{Rd}\rvert$ =	**1.047 ≈ 1**		
$\lvert M_{Ed}/M_{Rd}\rvert$ =			**1.047 ≈ 1**

Aunque no se satisface estrictamente el criterio general $E/R \leq 1$ para la situación de proyecto que se analiza el factor de utilización obtenido se considera satisfactorio, especialmente cuando para la situación de proyecto final, que se estudia posteriormente, puede disminuirse el diámetro de algunos tornillos de la unión.

Chapa frontal:

▪ Flexión: EN 1993-1-8:2005 tabla 6.6.

$W_{pl} = b_p t_p^2/4$, $M_{pl,Rd} = W_{pl} f_{yd} = (1 \cdot 35^2/4) \cdot 265/1.0$ Nmm/mm = 81.15 kNmm/mm, donde se ha tomado el límite elástico garantizado según UNE-EN-10025 para chapas de S275 con espesores entre 16 y 40 mm.

Por líneas de rotura:

1. $M_{Ed} \approx 2F_{t,Rd}/\kappa = 660/12.2 =$ 54.1 kN
2. $M_{Ed} \approx \max(F_{t,Rd}/4\pi$ en int, $F_{t,Rd}/5$ en zonas voladas) 65.6 kN

$M_{Ed}/ M_{pl,Rd}$ **0.808 < 1**

$\kappa = (2 \cdot 132-1.5 \cdot 30)/55+\rho \cdot (2 \cdot 49-30/2)/55+\rho \cdot (2 \cdot 55-30/2)/49+(2 \cdot 25-30/2)/49+(49-30/2)/25+(132-1.5 \cdot 30)/25 =$ 12.2

$\rho \approx \pi/4 = 0.785$

$W_{int} = M_{Ed} \cdot v \cdot \kappa$; $W_{ext} = 2F_{t,Rd} \cdot v$; $W_{int} = W_{ext} \Rightarrow$ $M_{Ed} = 2F_{t,Rd}/\kappa$

El coeficiente ρ aplicado a los términos del trabajo virtual interno (W_{int}) relativos al cuadrante inferior del mecanismo de colapso simplista supuesto (líneas gruesas en la figura), corrige dichos términos con respecto a otras

configuraciones más desfavorables (líneas finas en la figura).

Esquema del mecanismo 1:

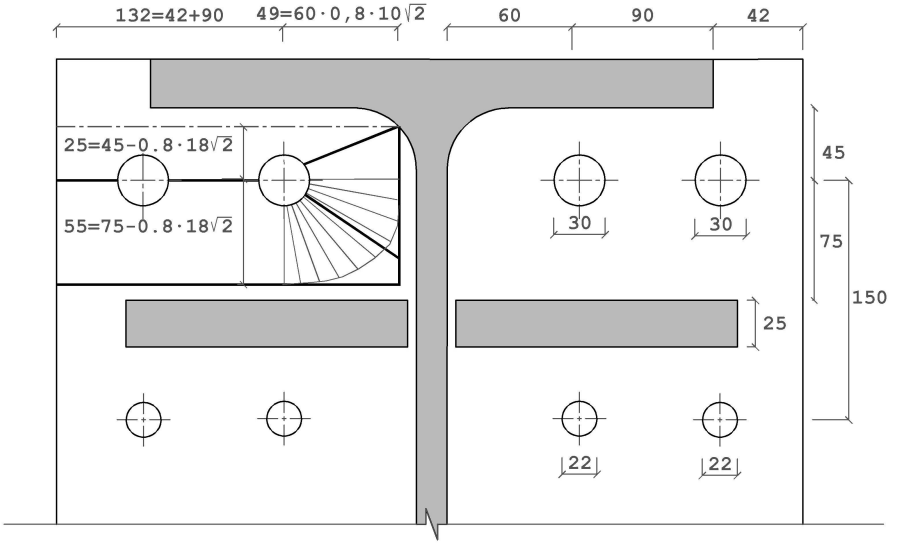


figura 26: Mecanismo de colapso de la chapa frontal

▪ Resistencia a aplastamiento de la chapa frontal ($F_{b,Rd}$).

Reducción de $F_{b,Rd}$ por "unión larga" según el artículo 3.8:

M27: $L_j = 450$ $\beta_{Lf} = 1-(450-15\cdot27)/(200\cdot27) =$ 0.99

M20: $L_j = 450$ $\beta_{Lf} = 1-(450-15\cdot20)/(200\cdot20) =$ 0.96

Para el cálculo de L_j se ha considerado la distancia entre tornillos extremos en la dirección de la transmisión del esfuerzo V_z pues, como se aprecia en la distribución de esfuerzos en el conjunto de la unión, todos los tornillos tienen una componente F_z significativa. En uniones con cocientes de utilización alejados de 1 es posible que sólo con la capacidad de los tornillos inferiores se satisfaga la condición $|V_{Ed}/V_{Rd}| < 1$, en cuyo caso el valor adoptado en el texto para L_j sería conservador.

Cálculo de $F_{b,Rd}$ según tabla 3.4 suponiendo $k_1 = 2.5$:

M27: $\alpha = \min [75/(3\cdot30), 150/(3\cdot30)-1/4, 1000/410, 1] =$ 0.83

$F_{b,Rd} = 0.99\cdot2.5\cdot0.83\cdot27\cdot35\cdot410/1.25$ N = 637 kN (más favorable que $F_{v,Rd}$)

M20: $\alpha = \min [125/(3\cdot22), 150/(3\cdot22)-1/4, 1000/410, 1] =$ 1

$F_{b,Rd} = 0.96\cdot2.5\cdot1\cdot20\cdot35\cdot410/1.25$ N = 551 kN (más favorable que $F_{v,Rd}$)

ELS (categoría B) según EN 1993-1-8:2005

Pretensado y resistencia a deslizamiento. Artículos 3.6.1 y 3.9.1:

M27:	Esfuerzo de pretensado: $F_{p,C} = 0.7 \cdot 459 \cdot 1000$ N =	321 kN
	$F_{s,Rd,ser} = 0.5 \cdot 0.7 \cdot 459 \cdot 1000/1.1$	146 kN
M20:	$F_{s,Rd,ser} = 0.5 \cdot 0.7 \cdot 245 \cdot 1000/1.1$	78 kN

Descompresión:

Se toma aproximadamente para la siguiente comprobación el brazo mecánico del cálculo en ELU:

Z = 1178/(1320+1264) =	0.456
N = M/Z = 841/0.456 =	1844 kN
$N/8F_{p,Cd}$ = 1844/(8·321/1.1) =	**0.790<1**

(Por lo tanto en servicio no se descomprime la unión)

Rozamiento:

Término de $F_{s,Rd,ser}$ debido a los TR superiores =	$8 \cdot 146 - \mu$ M/Z
Término de $F_{s,Rd,ser}$ debido a los TR inferiores =	$8 \cdot 78 + \mu$ M/Z
Conjunto de la unión_ ($V_{Rd,ser}$ independiente de M)	
$V_{Rd,ser} = (8 \cdot 146 - \mu M/Z)+(8 \cdot 78 + \mu M/Z)$	1793 kN
$\lvert V/V_{Rd,ser} \rvert$ = 1257/1793	**0.701<1**

(Por lo tanto en servicio no se producen deslizamientos).

5.2.2 Situación de proyecto 2: Acción mixta.

Se comprueba la misma pieza, considerando la colaboración de una cuantía de armadura longitudinal suficiente para que el "conjunto de la unión mixta" alcance el 100% del momento plástico de la sección parcial metálica en flexión pura. Además, si las solicitaciones en la fase constructiva lo permiten, la fila 2ª de tornillos se puede reducir a 4M20, según se aprecia en los cálculos siguientes.

Solicitaciones nominales de la unión:

$V_{Ed} = V_{pl,Rd}$ =	1759 kN	M_{Ed} =	-1767 kNm
$\gamma_f = 1.4$			
$V_{E,ser}$ =	1257 kN	$M_{E,ser}$ =	-1262 kNm

Conjunto de la unión mixta

Sin rozamiento en la zona de compresión y distribuyendo las fuerzas en los tornillos con criterios plásticos:

	F_z (kN)	F_x (kN)	z (m)
Armadura pasiva:		(8·491·0.500/1.15)	
8ϕ25 B500S	0↓	1712→	-0.370↑
Tornillos:			
4M27 fila (1)	292↓	1320→	-0.225↑
4M20 fila (2)	417↓	212→	-0.075↑
Eje del perfil	----------		
4M20 fila (3)	532↓	0	
4M20 fila (4)	532↓	0	
Zona de compresión:			
≈ ½ alma	0	-769←	0.180↓
Ala inferior	0	-2475←	0.285↓
V_{Rd} =	ΣF_z = 1773		
N_{Rd} =		ΣF_x = 0	
M_{Rd} =			$\Sigma F_x \cdot z$ = -1790 kNm
$\lvert V_{Ed}/V_{Rd}\rvert$ =	**0.992 < 1**		
$\lvert M_{Ed}/M_{Rd}\rvert$ =			**0.987 < 1**

Nótese que para determinar la distribución de esfuerzos en la segunda fila de tornillos se ha ajustado F_z para satisfacer la condición $|V_{Ed}/V_{Rd}| \leq 1$. El procedimiento utilizado hasta ahora de agotar toda la capacidad de los tornillos de las filas superiores en tracción aquí no es adecuado. Procediendo de este modo se encuentra:

	F_z (kN)	F_x (kN)	z (m)
4M20 fila (2)	292↓	704→	-0.075↑,

de donde $V_{Rd} = \Sigma F_z = 1648$, $|V_{Ed}/V_{Rd}| = 1.06$ y $M_{Rd} = \Sigma F_x \cdot z = -1831$, $|M_{Ed}/M_{Rd}| = 0.965$

Los cálculos realizados se refieren sólo a la propia sección mixta. Se presupone que todas las fuerzas F_x y F_z de la comprobación anterior son equilibradas por elementos existentes "al otro lado de la unión", que no se mencionan explícitamente, pero cuya omisión total o parcial invalidaría los cálculos. Puede parecer superflua la observación anterior, pero la realidad cotidiana de los proyectos de estructuras es cada vez más pródiga en "empotramientos al vacío", armaduras sin continuidad, etc. Es claro que estas consideraciones se refieren, prioritariamente, a la unión del "nudo extremo sin continuidad" descrito en el segundo cuadro de este apartado 5.2.

5.3 EXPLICACIÓN DEL USO DEL LIBRO DE CÁLCULO DISPONIBLE EN http://catedracero.ee.upm.es, CON REFERENCIA AL MISMO EJEMPLO ANTERIOR.

5.3.1 Consideraciones generales

Por las razones expuestas en el apartado dedicado a las uniones F00B, para esta unión también se distribuyen dos fichas distintas: Se distinguen las uniones con cartelas de las que no las tienen (F00BC.xls y F01BC.xls. respectivamente)

El resto de las notas generales del apartado 2.3 son directamente aplicables a esta unión por lo que no se repiten.

5.3.2 Datos

Como hasta aquí la unión se define en la hoja DATOS. Igual que la unión F00B ésta queda caracterizada por dos grupos independientes de tornillos, lo que permite estudiar prácticamente todas las configuraciones posibles de esta unión (por lo menos dentro del ámbito de la edificación).

En la hoja de cálculo aparece un apartado nuevo en el cual se define la armadura pasiva. Sus propiedades mecánicas pueden encontrarse en la hoja oculta "aceros". Si se desea utilizar un acero distinto al B500S debe completarse la tabla correspondiente de la hoja "aceros" siguiendo las indicaciones expuestas en 2.3.1

Las dos figuras siguientes son imágenes de la entrada de datos (en primer lugar para la situación de proyecto 1 –estructura metálica- y en segundo lugar para la situación de proyecto 2 –acción mixta-. Igual que en la unión F00B los datos relativos a la cartela sólo son significativos para el fichero en el que se comprueba la chapa frontal acartelada. Las razones para mantener el esquema de la hoja DATOS idéntico en ambos ficheros es la ya conocida.

En 5.2.2 se analiza la unión con las cartelas antedichas, por lo que el fichero que debe consultarse para comprobar la unión es el F01BC.xls. (para comprobar la situación de proyecto 1 debe utilizarse el fichero F01B.xls)

5.3.3 Resultados

La única diferencia de la hoja F00B respecto a la de la unión anterior es que a

los resultados ya conocidos se suma la comprobación de la armadura pasiva.

Como ya se ha visto todas las comprobaciones de las hojas de cálculo son de la forma E/R ≤ 1 presentándose el resultado VÁLIDO o NO VÁLIDO según corresponda. Para el diseño de la unión que se analiza en la primera fase del proyecto (estructura metálica pura) un porcentaje muy elevado de las comprobaciones se califican como NO VÁLIDAS. Sin embargo una inspección detallada de las mismas muestra que para todas ellas se encuentra E/R = 1.05. Error inferior a otros inherentes a cualquier análisis estructural, como los debidos a la modelación de la geometría, las cargas, los materiales, etc. Sin embargo, ya se ha indicado que corresponde al usuario de las hojas de cálculo interpretar los resultados según su mejor criterio y asumirlos sólo cuando lo considere oportuno.

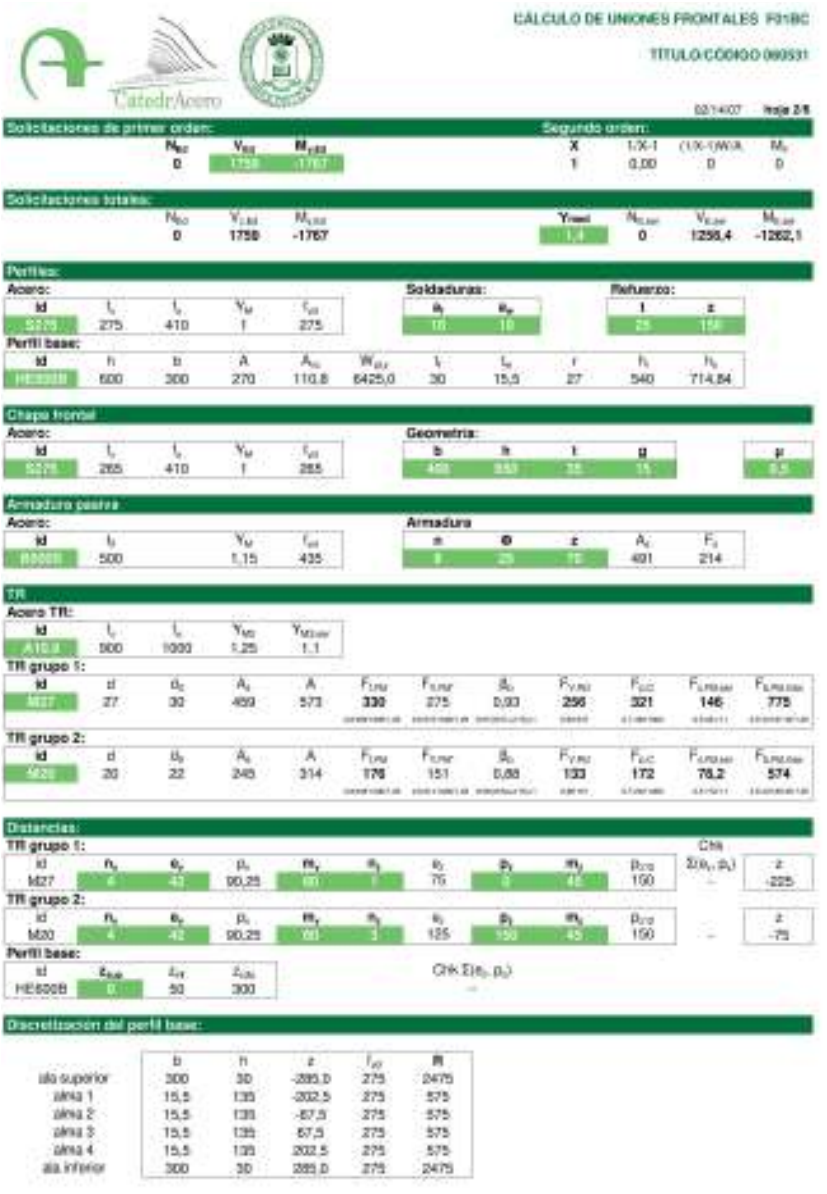
Del ELS sólo cabe destacar que en la comprobación del deslizamiento no se considera el efecto de la armadura pasiva. Al estar ésta traccionada (para valores de M negativos) sobre el perfil existirá una compresión para garantizar el equilibrio del conjunto. Esta compresión no se tiene en cuenta a la hora de estimar la fuerza de rozamiento de la unión metálica. Si en alguna unión se precisa de esta reserva resistente, puede incluirse siguiendo los pasos que se muestran en las siguientes dos uniones, en las cuales es el axil el esfuerzo predominante.

Las comprobaciones de la chapa frontal son las ya comentadas en el capítulo 4. El mecanismo que se ha comprobado manualmente se corresponde con el M0 del fichero F01BC.xls (en los que la chapa se estudia contando con la cartela horizontal). En este fichero los mecanismos M1 y M2 tienen una charnela más que los que los mismos comentados en 4.3.2.2: la C4 (véanse las figuras de las fichas: En F00B.xls C4 es un eje de rotación y en las uniones con cartela además es charnela). También debe destacarse que en estos mecanismos se utilizan simultáneamente dos valores de ρ, uno para calibrar los mecanismos implícitos en la tabla 6.6 de EN 1993-1-8:2005 según se indico en 4.2 y otro para hacer lo mismo con los conocidos “abanicos de esquina” comentados en 5.2.

La hoja NUDO merece un pequeño comentario. En ella se dibuja/compara el diagrama de interacción de la sección metálica y las solicitaciones totales de la sección mixta. Obviamente las solicitaciones superan la capacidad de la sección metálica, lo que no invalida la unión mixta. El valor de esta hoja es, por tanto, meramente informativo y permite detectar errores de bulto en el diseño de la unión.

En las figuras que siguen además de las hojas DATOS de los libros F01B y F01BC, se muestran algunos resultados de situación de proyecto 2.

figura 27:Situación de proyecto 1 (Estructura metálica). Hoja DATOS particularizada para el diseño 5.2.1



CALCULO DE UNIONES FRONTALES F01BC

TITULO CÓDIGO 000531

02/14/07 Hoja 2/6

Solicitaciones de primer orden:

N_{Ed}	V_{Ed}	$M_{y,Ed}$
0	1758	-1767

Segundo orden:

X	1/X-1	(1/X-1)W/A	M_{ip}
1	0,00	0	0

Solicitaciones totales:

N_{Ed}	$V_{y,Ed}$	$M_{y,Ed}$
0	1758	-1767

γ_{med}	$N_{Ed,ser}$	$V_{Ed,ser}$	$M_{Ed,ser}$
1,4	0	1256,4	-1262,1

Perfiles:

Acero:

id	f_y	f_u	γ_M	f_{yd}
S275	275	410	1	275

Soldaduras:

a_f	a_w
10	10

Refuerzo:

t	z
25	150

Perfil base:

id	h	b	A	A_{vz}	$W_{pl,y}$	t_f	t_w	r	h_1	h_0
HE500B	500	300	270	110,8	6425,0	30	15,5	27	540	714,84

Chapa frontal:

Acero:

id	f_y	f_u	γ_M	f_{yd}
S275	265	410	1	265

Geometría:

b	h	t	g	μ
400	550	35	15	0,5

Armadura pasiva:

Acero:

id	f_y	γ_M	f_{yd}
B500S	500	1,15	435

Armadura

n	Φ	z	A_s	F_s
8	25	75	491	214

TR:

Acero TR:

id	f_y	f_u	γ_{M0}	$\gamma_{M0,ser}$
A10.9	900	1000	1,25	1,1

TR grupo 1:

id	d	d_0	A_s	A	$F_{t,Rd}$	$F_{t,ser}$	B_p	$F_{v,Rd}$	$F_{p,C}$	$F_{t,Rd,ser}$	$F_{s,Rd,ser}$
M27	27	30	459	573	330	275	0,93	256	321	146	775

TR grupo 2:

id	d	d_0	A_s	A	$F_{t,Rd}$	$F_{t,ser}$	B_p	$F_{v,Rd}$	$F_{p,C}$	$F_{t,Rd,ser}$	$F_{s,Rd,ser}$
M20	20	22	245	314	176	151	0,88	133	172	78,2	574

Distancias:

TR grupo 1:

id	n_x	e_x	p_x	m_y	n_y	e_y	p_y	m_y	$p_{y,0}$	Chk $\Sigma(e_y, p_y)$	z
M27	4	42	90,25	60	1	75	0	45	150	-	-225

TR grupo 2:

id	n_x	e_x	p_x	m_y	n_y	e_y	p_y	m_y	$p_{y,0}$		z
M20	4	42	90,25	60	3	125	150	45	150	-	-75

Perfil base:

id	$z_{b,ini}$	A_{vz}	$z_{b,fin}$
HE500B	0	50	300

Chk $\Sigma(e_y, p_y)$

-

Discretización del perfil base:

	b	h	z	f_{yd}	R
ala superior	300	30	-285,0	275	2475
alma 1	15,5	135	-202,5	275	575
alma 2	15,5	135	-67,5	275	575
alma 3	15,5	135	67,5	275	575
alma 4	15,5	135	202,5	275	575
ala inferior	300	30	285,0	275	2475

figura 28: Situación de proyecto 2 (acción mixta). Hoja DATOS particularizada para el diseño 5.2.2

CÁLCULO DE UNIONES FRONTALES F31BC

TITULO:CÓDIGO 060531

02/2007 hoja 5/6

Resistencia de cada TR: ELU según EN 1993-1-8: 2005

$\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} + \frac{F_{v,Ed}}{1,4F_{v,Rd}} \leq 1$ $\qquad \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} < 1$

	$F_{t,Ed}$	$F_{v,Ed}$		$F_{t,Ed}/F_{t,Rd}$			
TR grupo 1: TRgr1 fila 1:	72,56 / 256	327,32 / 462	≤ 1	0,09	< 1	VÁLIDO	
	0,28 +	0,71	=	0,99	< 1	VÁLIDO	
TR grupo 2: TRgr2 fila 1:	103,41 / 133	52,81 / 246,4	≤ 1	0,30	< 1	VÁLIDO	
	0,78 +	0,21	=	0,99	< 1	VÁLIDO	
TR grupo 2: TRgr2 fila 2:	131,89 / 133	0,05 / 246,4	≤ 1	0,00	< 1	VÁLIDO	
	0,99 +	0,00	=	0,99	< 1	VÁLIDO	
TR grupo 2: TRgr2 fila 3:	131,90 / 133	0,03 / 246,4	≤ 1	0,00	< 1	VÁLIDO	
	0,99 +	0,00	=	0,99	< 1	VÁLIDO	

Esfuerzos en la armadura pasiva:

	$F_{t,Ed}$	z	M_y	R	E/R		
Armadura	1038,30	-0,370	-628,37	1712	0,99	< 1	VÁLIDO

Esfuerzos en los TR:

	$F_{t,Ed}$	$F_{v,Ed}$	z	M_y
TR grupo 1:				
TRgr1 fila 1:	256,24	1309,28	-0,225	-294,59
TR grupo 2:				
TRgr2 fila 1:	413,62	211,26	-0,075	-15,84
TRgr2 fila 2:	527,54	0,20	0,075	0,02
TRgr2 fila 3:	527,60	0,10	0,225	0,02

Esfuerzos en el perfil: **Resistencia del perfil**

	F_x	z	M_y	R	E/R			
ala superior	-0,09	-0,285	0,02	2475	0,00	< 1	VÁLIDO	
alma 1	-0,11	-0,203	0,02	575	0,00	< 1	VÁLIDO	
alma 2	-0,22	-0,068	0,02	575	0,00	< 1	VÁLIDO	
alma 3	-192,93	0,068	-13,02	575	0,34	< 1	VÁLIDO	
alma 4	-570,63	0,203	-115,56	575	0,99	< 1	VÁLIDO	
ala inferior	-2455,16	0,285	-699,72	2475	0,99	< 1	VÁLIDO	

Equilibrio

				ΣF , ΣM		0,01·E	
$V_{Ed} = \Sigma F_z$	1759,00		-	V_{Ed} =	0,00	< 17,59	VÁLIDO
$N_{Ed} = \Sigma F_x$		0,00	-	N_{Ed} =	0,00	< 17,59	VÁLIDO
$M_{y,Ed} = \Sigma M$		-1767,00	-	M_{Ed} =	0,00	< 17,67	VÁLIDO

Aplastamiento de la chapa

TR grupo 1:

TRgr1 fila 1:

$F_{b,Rd(mp)}$	$\alpha \cdot k_1/2,5$	β_U	$F_{b,Rd}$	$F_{v,Ed}$	$F_{v,Ed}/F_{b,Rd}$		
774,8	0,79	0,99	604,79	72,56	0,12	< 1	VÁLIDO

TR grupo 2:

TRgr2 fila 1:

$F_{b,Rd(mp)}$	$\alpha \cdot k_1/2,5$	β_U	$F_{b,Rd}$	$F_{v,Ed}$	$F_{v,Ed}/F_{b,Rd}$		
574	1,00	0,96	552,48	103,41	0,19	< 1	VÁLIDO

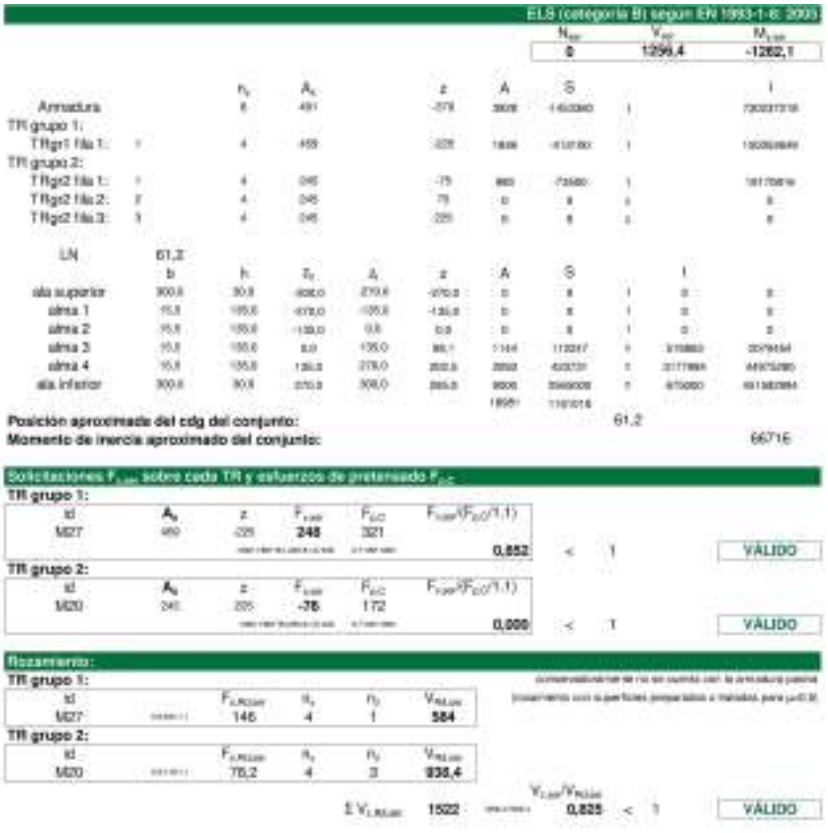
TRgr2 fila 2:

$F_{b,Rd(mp)}$	$\alpha \cdot k_1/2,5$	β_U	$F_{b,Rd}$	$F_{v,Ed}$	$F_{v,Ed}/F_{b,Rd}$		
574	1,00	0,96	552,48	131,89	0,24	< 1	VÁLIDO

TRgr2 fila 3:

$F_{b,Rd(mp)}$	$\alpha \cdot k_1/2,5$	β_U	$F_{b,Rd}$	$F_{v,Ed}$	$F_{v,Ed}/F_{b,Rd}$		
574	1,00	0,96	552,48	131,90	0,24	< 1	VÁLIDO

figura 29: Hoja FB particularizada para el diseño 5.2.2. Estado límite último.



ELS (categoría B) según EN 1993-1-8: 2005

N_{Ed}	V_{Ed}	M_{Ed}
0	1256,4	-1262,1

		n_v	A_v	z	A	S		I
Armadura		8	491	-579	[illegible]	[illegible]	1	[illegible]
TR grupo 1:								
TRgr1 fila 1:	1	4	455	-225	[illegible]	[illegible]	1	[illegible]
TR grupo 2:								
TRgr2 fila 1:	1	4	245	-75	980	[illegible]	1	[illegible]
TRgr2 fila 2:	2	4	245	75	0	0	0	0
TRgr2 fila 3:	3	4	245	225	0	0	0	0

LN	61,2								
	b	h	z_G	A_i	z	A	S	I	
ala superior	300,0	30,0	[illegible]	270,0	[illegible]	0	0	0	0
alma 1	15,0	135,0	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0	0	0	0
alma 2	15,0	135,0	[illegible]	0,0	0,0	0	0	0	0
alma 3	15,0	135,0	0,0	135,0	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
alma 4	15,0	135,0	[illegible]	270,0	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
ala inferior	300,0	30,0	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
						19981	[illegible]		

Posición aproximada del cdg del conjunto: 61,2

Momento de inercia aproximado del conjunto: 66716

Solicitaciones $F_{v,Ed}$ sobre cada TR y esfuerzos de pretensado $F_{p,C}$

TR grupo 1:

Id	A_s	z	$F_{v,Ed}$	$F_{p,C}$	$F_{v,Ed}/(F_{p,C}/1,1)$			
M27	459	-225	**248**	321				
					0,852	<	1	VÁLIDO

TR grupo 2:

Id	A_s	z	$F_{v,Ed}$	$F_{p,C}$	$F_{v,Ed}/(F_{p,C}/1,1)$			
M20	245	225	**-78**	172				
					0,000	<	1	VÁLIDO

Rozamiento:

TR grupo 1:

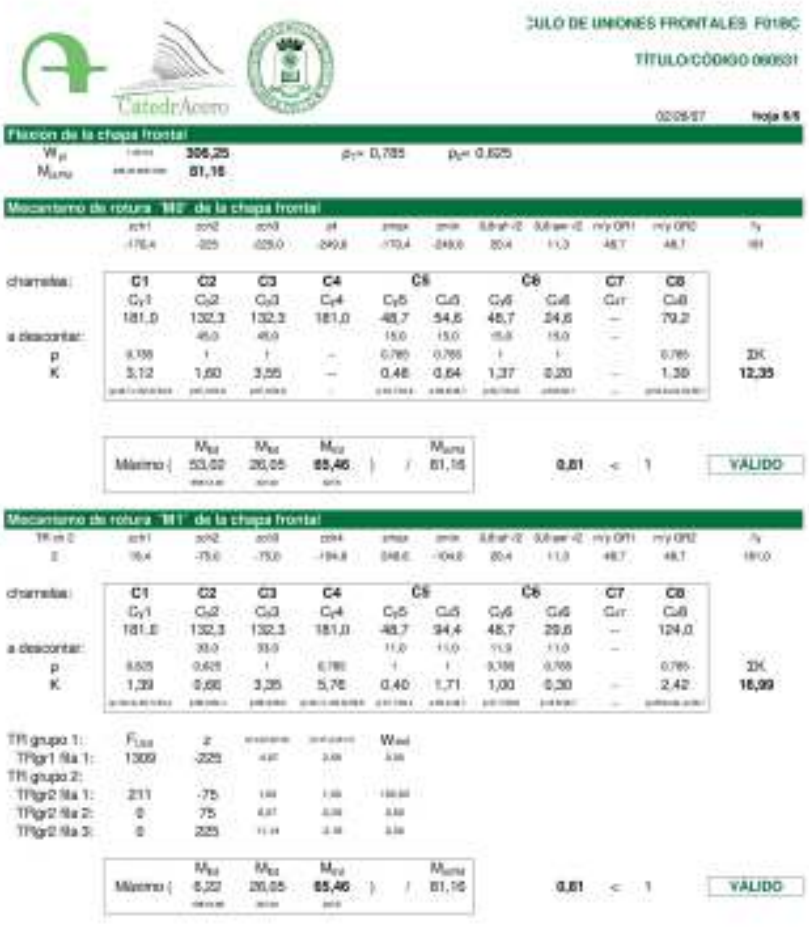
Id		$F_{v,Rd,ser}$	n_s	n_n	$V_{R,Ed,ser}$
M27	[illegible]	146	4	1	**584**

TR grupo 2:

Id		$F_{v,Rd,ser}$	n_s	n_n	$V_{R,Ed,ser}$
M20	[illegible]	76,2	4	3	**938,4**

$\Sigma V_{R,Ed,ser}$ 1522 $V_{v,Ed}/V_{R,Ed,ser}$ **0,825** < 1 VÁLIDO

figura 30: Hoja FB particularizada para el diseño 5.2.2. Estado límite de servicio.



CÁLCULO DE UNIONES FRONTALES F01BC

TÍTULO/CÓDIGO 060631

02/05/07 hoja 6/6

Flexión de la chapa frontal

W_{pl}		306,25	ρ_{LT}= 0,785	ρ_{LM}= 0,625
M_{Lrd}		81,16		

Mecanismo de rotura "M0" de la chapa frontal

	α=1	α=2	α=3	α4	αmax	αmin	S_{Ef}ar -/2	S_{Ef}ar -/2	m/y OR1	m/y OR2	%
	-176,4	-225	-225,0	-249,8	-170,4	-249,0	80,4	11,3	48,7	48,7	181

chanelas:	C1	C2	C3	C4	C5		C6		C7	C8	
	C_Y1	C_U2	C_U3	C_Y4	C_Y5	C_U5	C_Y6	C_U6	C_{Ur}	C_U8	
	181,0	132,3	132,3	181,0	48,7	54,6	48,7	24,6	–	79,2	
a descontar:		45,0	45,0		15,0	15,0	15,0	15,0	–		
p	0,785	1	1	–	0,785	0,785	1	1		0,785	ΣK
K	3,12	1,60	3,55	–	0,48	0,64	1,37	0,20	–	1,39	12,35

	M_{Rd}	M_{Rd}	M_{Rd}			M_{Lrd}				
Máximo (	53,02	26,05	65,46	)	/	81,16	0,81	<	1	VÁLIDO

Mecanismo de rotura "M1" de la chapa frontal

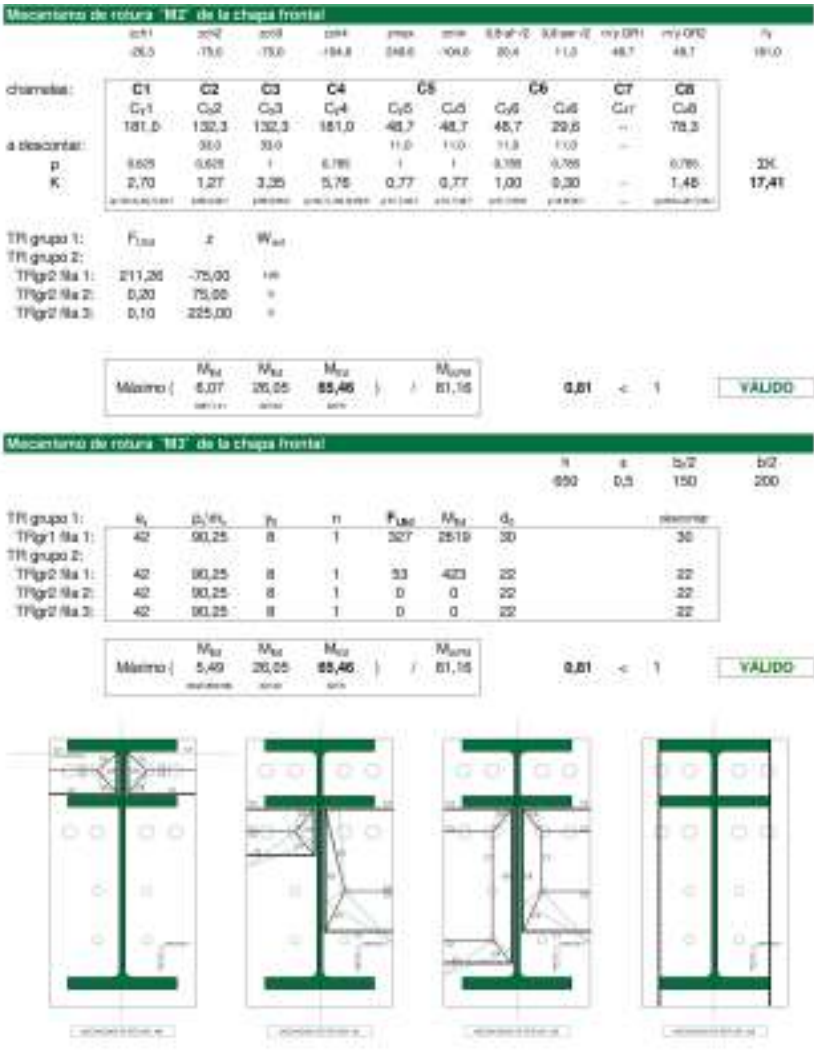
TR en Σ	α=1	α=2	α=3	α=4	αmax	αmin	S_{Ef}ar -/2	S_{Ef}ar -/2	m/y OR1	m/y OR2	%
Σ	16,4	-75,0	-75,0	-194,8	248,0	-194,8	80,4	11,3	48,7	48,7	181,0

chanelas:	C1	C2	C3	C4	C5		C6		C7	C8	
	C_Y1	C_U2	C_U3	C_Y4	C_Y5	C_U5	C_Y6	C_U6	C_{Ur}	C_U8	
	181,0	132,3	132,3	181,0	48,7	94,4	48,7	29,6	–	124,0	
a descontar:		33,0	33,0		11,0	11,0	11,0	11,0	–		
p	0,625	0,625	1	0,785	1	1	0,785	0,785		0,785	ΣK
K	1,39	0,66	3,35	5,76	0,40	1,71	1,00	0,30	–	2,42	16,99

TR grupo 1:	F_{Ed}	z			W_{ed}
TRgr1 fila 1:	1309	-225			
TR grupo 2:					
TRgr2 fila 1:	211	-75			
TRgr2 fila 2:	0	75			
TRgr2 fila 3:	0	225			

	M_{Rd}	M_{Rd}	M_{Rd}			M_{Lrd}				
Máximo (	6,22	26,05	65,46	)	/	81,16	0,81	<	1	VÁLIDO

figura 31: Hoja CHAPA particularizada para el diseño
5.2.2.Mecanismos de colapso M0 y M1.



Mecanismo de rotura "M2" de la chapa frontal

	x_1	x_2	x_3	x_4	y_{max}	x_{min}	$0,5 \cdot a \cdot \sqrt{2}$	$0,5 \cdot a_{min} \cdot \sqrt{2}$	m_y OR1	m_y OR2	h_f
	-26,5	-75,0	-75,0	-184,8	248,0	-104,0	20,4	11,0	48,7	48,7	181,0

	C1	C2	C3	C4	C5		C6		C7	C8	
chanelas:	C_{f1}	C_{f2}	C_{f3}	C_{f4}	C_{f5}	C_{f5}	C_{f6}	C_{f6}	C_{f7}	C_{f8}	
	181,0	132,3	132,3	181,0	48,7	48,7	48,7	29,6	--	78,3	
a descontar:		30,0	30,0		11,0	11,0	11,0	11,0	--		
p	0,625	0,625	1	0,785	1	1	0,785	0,785		0,785	2K
K	2,70	1,27	3,25	5,75	0,77	0,77	1,00	0,30	--	1,46	17,41

	F_{Ed}	x	W_{ef}
TR grupo 1:			
TR grupo 2:			
TRgr2 fila 1:	211,26	-75,00	
TRgr2 fila 2:	0,20	75,00	
TRgr2 fila 3:	0,10	225,00	

	M_{Ed}	M_{Rd}	M_{Rd}			M_{Lim}				
Máximo (	6,07	26,05	**65,46**	)	/	81,16	**0,81**	<	1	VÁLIDO

Mecanismo de rotura "M3" de la chapa frontal

h	a	$b_f/2$	$b/2$
650	0,5	150	200

	e_f	p_f/m_f	β_f	n	F_{Ed}	M_{Rd}	d_c			
TR grupo 1:										
TRgr1 fila 1:	42	90,25	8	1	327	2519	30			30
TR grupo 2:										
TRgr2 fila 1:	42	90,25	8	1	53	423	22			22
TRgr2 fila 2:	42	90,25	8	1	0	0	22			22
TRgr2 fila 3:	42	90,25	8	1	0	0	22			22

	M_{Ed}	M_{Rd}	M_{Rd}			M_{Lim}				
Máximo (	5,49	26,05	**65,46**	)	/	81,16	**0,81**	<	1	VÁLIDO

figura 32: Hoja CHAPA particularizada para el diseño

5.2.2.Mecanismos de colapso M2 y M3.

5.4 RECOMENDACIONES SOBRE CONTROL DE CALIDAD

Es usual en esta unión que las limitaciones por esfuerzo cortante en servicio sea muy grande ("coeficientes de utilización" próximos a 1): Será generalmente necesario asegurar el cumplimiento de los coeficientes de rozamiento exigidos, si se deben evitar deslizamientos en servicio (EAE, M.F. 2006: 58.7; CTE DB SE-A, M.V. 2006: 7.3.2; EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7; prEN 1090-2: 2006-10 8.4, tabla 14 y anejoG). Es preciso establecer controles fiables de los esfuerzos de pretensado reales de los tornillos, mediante una homologación del procedimiento de apriete en función del estado de suministro de tornillos y tuercas, e incluir el control in situ del estado real.

La resistencia de la chapa frontal normalmente en este tipo de uniones será crítica, por lo que frecuentemente será necesario adoptar chapas de espesores elevados. En tal caso convendrá especificar ensayos ultrasónicos complementarios de ausencia de "defecto de hoja" (cuestión que no deja de ser importante aun estando el espesor de las chapas "cosido" por los tornillos), así como procedimientos apropiados de soldadura del perfil a la chapa en taller.

Si es necesario disponer más de dos tornillos por fila las uniones anchas resultantes son relativamente susceptibles de desajustes de las superficies en contacto. Deberán especificarse las tolerancias de huelgos admitidos, y prever soluciones para posibles huelgos excesivos (dentro de un orden) cuando pudieran comprometer la seguridad y/o la durabilidad de la unión, por ejemplo mediante forros o "peines" incluidos a posteriori (EAE, M.F., 2006: 76.7 y 80; prEN 1090-2:2006-10, artículo 8.1).

Se recomienda la preparación de bordes representada en los detalles de soldadura del ala superior del perfil a la chapa frontal. Su fundamentación puede consultarse en EAE, M.F. 2006: artículo 59.6 y en antigua UNE-ENV 1993-1-1, AENOR Dic.96: artículo 6.6.3 (3) y figura.6.6.5.a.

6 UNIONES ATORNILLADAS FRONTALES EN TRACCIÓN PURA, TIPO F10B: ACOTADAS A CARAS SUPERIOR E INFERIOR DEL PERFIL.

6.1 DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN.

Se trata de resolver los empalmes in situ de las piezas traccionadas de una estructura triangulada diseñada con criterios considerados óptimos actualmente para luces y solicitaciones medias-altas en edificación:

- Utilización de perfiles abiertos de las series H, de radios de giro adecuados, y accesibles en todas sus caras, tanto para la realización de las uniones en taller y en obra, como para su inspección y control.
- Nudos mayoritariamente sin cartelas, aplicando los criterios al respecto del Eurocódigo 3.
- Utilización de acero S355, cuyo elevado límite elástico se aprovecha íntegramente con este tipo estructural, raramente condicionado por los estados límite de servicio, si las relaciones canto/luz son apropiadas. La reducción conseguida de las cuantías de acero estructural compensa muy sobradamente el pequeño incremento de precio unitario en origen, y no debería perturbar la programación de los pedidos, que hay que presuponer racionalmente organizados en las obras de elevado tonelaje.
- Uniones in situ atornilladas.

En esta unión no se crean resaltos en el alzado del perfil, lo que evita interferencias con otros elementos constructivos del edificio. Esta es la principal ventaja y diferencia de esta unión respecto a la que se estudia en el próximo capítulo, a cambio, esto implica una elevada concentración de tornillos en un espacio reducido, y por lo tanto la solución atornillada se fuerza al máximo.

Aunque lógicamente la disposición de estos empalmes en las secciones menos solicitadas los simplificará considerablemente, en el ejemplo seguidamente desarrollado se han supuesto las condiciones más difíciles, para mostrar la viabilidad de esta solución incluso cuando las circunstancias constructivas, de transporte y/o de montaje, impongan la ubicación de la unión

en los puntos más comprometidos, es decir, en los de máximas solicitaciones de tracción.

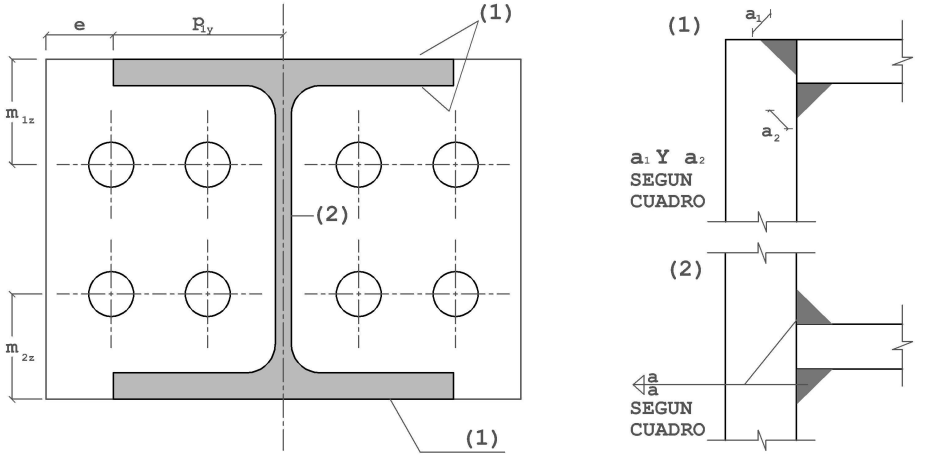


figura 33: Unión atornillada frontal. Disposición F10B

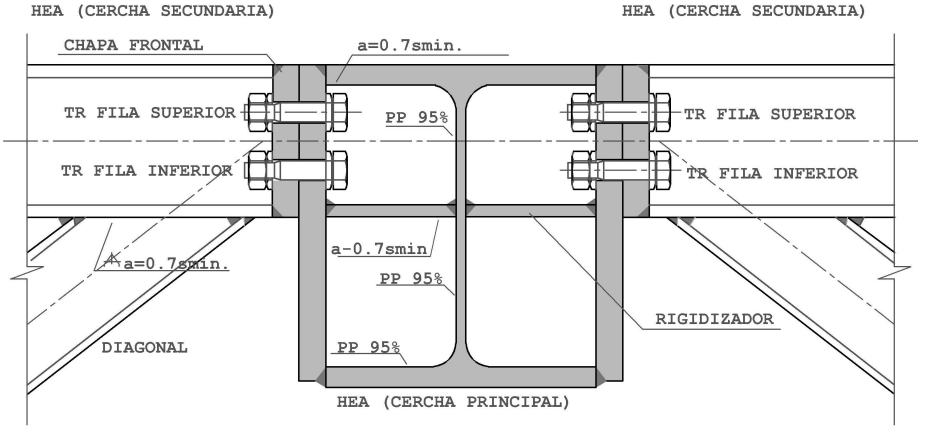


figura 34: Unión atornillada frontal. Disposición F10B

6.2 EJEMPLO NUMÉRICO DESARROLLADO.

En este apartado se desarrollan los cálculos para la unión particular que se describe a continuación. La mayoría de los comentarios a estos cálculos, comunes al resto de uniones que se estudian en otros capítulos, pueden encontrarse en el apartado 2.2.

F10B HEA 180 (S355)

TORNILLOS			
A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1) Superficies preparadas y/o tratadas para $\mu \geq 0.5$ (EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejoG)			
El par de apriete para tornillos de alta resistencia (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento.			
Valores característicos (N/mm^2)		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 1000$	$f_{yb} = 900$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1.25$

Definición de la Unión: F10B HEA 180 (S355)			
Chapa frontal S355J2G3 Control ultrasónico específico según UNE 36100 y 7278 al grado B			Calzo/forro para tolerancia S355J2G3
# 290·171·35 Ala superior: ◣ 18 + ◣ 18 según detalle Alma ◢◣ 10 Ala inferior: ◣ 18 + ◣ 18 según detalle			$g \leq 15$ mm.
Tornillos superiores		**Tornillos inferiores**	
Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)	Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)
4M24 (taladros ϕ 26)	$e_y = 35$ $p_y = 67$ $e_z = 50$	4M20 (taladros ϕ 22)	$e_y = 42$ $p_y = 60$ $e_z = 45$

Solicitaciones nominales de la unión:

N_{Ed} =	1164 kN	$\gamma_f = 1.4$	N_{ser} =	831 kN
$V_{z,Ed}$ =	376 kN		$V_{z,ser}$ =	269 kN
$M_{y,Ed}$ =	(-)18.9 kNm		$M_{y,ser}$ =	-13.5 kNm

Comprobación del perfil base HEA 180 (S355) según EN 1993-1-1:2005 y EN 1993-1-8:2005

Nudo extremo de la cercha. Dimensiones eficaces según EN 1993-1-8:2005:

Nudo sin rigidización con diagonal HEA100 traccionada. Artículos de EN 1993-1-8:2005 4.10 y 6.2.6.3 particularizados para el ala del cordón (t_f, t_w, r), y la diagonal (t_{fb}), suponiendo está soldada con dos cordones de ángulo de garganta $0.7 \cdot t_{fb}$:

$b_{eff} = t_w+2r+7t_f =$	102.5 mm $\geq b_{fb}$ = 100 mm
$t_w \cdot [3t_{fb}+5(r+t_f)]$	879 mm^2 $\geq b_{fb}t_{fb}$ = 800 mm^2

Luego el alma del HEA 180 no requiere rigidizadores verticales en el nudo.

Resistencia del perfil base según EN 1993-1-1:2005

▪ Tracción y flexión pura. Artículos 6.2.3 y 6.2.5:

$N_{pl,Rd} = 4525 \cdot 355 \cdot 10^{-3}$	1606 kN
$M_{y,pl,Rd} = 324000 \cdot 355 \cdot 10^{-6}$	115.3 kNm
$N_{Ed}/ N_{pl,Rd}$	**0.725<1**
$M_{y,Ed}/ M_{y,pl,Rd}$	**0.164<1**

▪ Interacción N-M en secciones I o H traccionadas (dos formatos de comprobación equivalentes). Artículo 6.2.9.1 (5):

$a = \min(0.5, (A-2 \cdot b \cdot t_f)/A$	0.244
$N_{Ed}/ N_{pl,Rd} + (1-0.5 \cdot a) \cdot M_{y,Ed}/ M_{y,pl,Rd}$	**0.868<1**
$M_{N,y,Rd} = M_{y,pl,Rd}(1-N_{Ed}/ N_{pl,Rd})/(1-0.5 \cdot a)$	36.2 kNm
$M_{y,Ed}/ M_{N,y,Rd}$	**0.522<1**

(para perfiles de las series IPE y HE es conservador tomar el factor $1-0.5 \cdot a$ = 0.9, simplificación que agiliza notablemente los cálculos manuales. Para perfiles HEB/A el factor anterior varía de 0.89 -HEB 140 y HEA 120- hasta 0.77 -HEB1000 y HEA1000-. El intervalo de variación para toda la serie HE es de 0.9 –HEM300- hasta 0.72 –HE1000AA-. Para la serie IPE se encuentra 0.8 para el IPEO270 y 0.77 para el IPE600)

▪ Esfuerzo cortante. Artículo 6.2.6:

$V_{z,pl,Rd} = 1447 \cdot 355 \cdot 10^{-3}/\sqrt{3}$ 296.6 kN

$V_{z,Ed}/ V_{z,pl,Rd}$ **1.268>1**

NO VALIDO

En realidad el ala inferior de la diagonal está soldada tan cerca de la chapa frontal que pueden considerarse eficaces a cortante el 100 % de las alas de la HEA180, con lo que $V_{z,pl,Rd} = 4530 \cdot 355 \cdot 10^{-3}/\sqrt{3} = 927$ kN; $V_{z,Ed}/ V_{z,pl,Rd} = 0.405 < 0.5$; sin embargo en otro tipo de nudo posiblemente sería preciso reforzar el alma según el cálculo siguiente.

Resistencia de la sección con refuerzo de alma #10:

▪ Tracción, cortante y flexión. Artículo 6.2.10 (3):

$N_{pl,Rd} = (4525+10 \cdot 152) \cdot 355 \cdot 10^{-3}$ 2146 kN

$V_{z,pl,Rd} = (1447+10 \cdot 152) \cdot 355 \cdot 10^{-3}/\sqrt{3} =$ 608 kN

$M_{y,pl,Rd} = (325000+10 \cdot 152^2/4) \cdot 355 \cdot 10^{-6}$ 135.8 kNm

$N_{Ed}/ N_{pl,Rd}$ **0.542<1**

$V_{z,Ed}/ V_{z,pl,Rd}$ **0.618<1**

$M_{y,Ed}/ M_{y,pl,Rd}$ **0.139<1**

▪ Interacción M-V. Artículo 6.2.8:

$\rho = (2\ V_{Ed}/V_{pl,Rd}-1)^2 = (2 \cdot 376/608.1-1)^2$ $\rho = 0.056$

(con $V_{Ed} > 0.5 \cdot V_{pl,Rd}$)

$M_{V,Rd} = M_{pl,Rd} - (\rho \cdot A_v^2/(4 \cdot t_w) \cdot f_{yd}) =$

$135.8-0.056 \cdot (14.47 \cdot 100+152 \cdot 10)^2/4/6 \cdot 355 \cdot 10^{-6} =$ 128.6 kNm

$m_V = M_{V,Rd}/M_{y,pl,Rd} = 108.3/135.8 =$ 0.946

$1- m_v$ = perdida de resistencia a flexión por interac. M/V 0.054

▪ Interacción M-N. Artículo 6.2.9.1 (5):

$a = \min(0.5, (A-2 \cdot b \cdot t_f)/A$ 0.434

$M_{N,y,Rd} = M_{y,pl,Rd}(1-N_{Ed}/N_{pl,Rd})/(1-0.5 \cdot a) =$

$135.8 \cdot (1-0.542)/0.78 =$ 79.4 kNm

$m_N = M_{N,y,Rd}/M_{y,pl,Rd} = 79.4/135.8$ 0.584

$1-m_N$ = pérdida de resistencia a flexión por interac. M/N 0.416

▪ Interacción N-M-V según EN 1993-1-1:2005 6.2.10(3)

$M_{V,N,y,Rd} = M_{N,y,Rd} \cdot (1- \rho) =$ 75.0 kNm

$M_{y,Ed}/ M_{V,N,y,Rd} = 18.9/75.0$ **0.252<1**

▪ Fórmula de interacción N-M-V aproximada, independiente de la de EN 1993-1-1:2005, tomada del Anejo A3.3 de "Estructuras de edificación: análisis

lineal y no lineal", Ariel, 2002:

$m+(1-m_V)+(1-m_N)/m_V \leq 1$

0.139 + 0.054 + 0.416/0.946 **0.632<1**

O bien, de manera equivalente:

$M_{V,N,y,Rd} = [m_V-(1-m_N)/m_V]M_{y,pl,Rd}$

$M_{V,N,y,Rd} = (0.946-0.416/0.946)\cdot M_{y,pl,Rd}$ 68.9 kNm

$M_{y,Ed}/M_{V,N,y,Rd}$ = 18.9/68.9 = **0.274<1**

Fórmulas ad hoc del tipo $m_V\ m_N\cdot M_{y,pl,Rd}$, ó $[1-(1-m_V)-(1-m_N]\cdot M_{y,pl,Rd} = (m_V+m_N-1)\cdot M_{y,pl,Rd}$ son contrarias a la seguridad.

ELU según EN 1993-1-8:2005

Cálculos preliminares:

▪ Reducción de $F_{v,Rd}$ por forros. Artículo 3.6.1 (12):

M24: $\beta_p = 9\cdot 24/(8\cdot 24+3\cdot 15)$ $\beta_p = 0.911$

M20: $\beta_p = 9\cdot 20/(8\cdot 20+3\cdot 15)$ $\beta_p = 0.878$

▪ Resistencia de cálculo de cada tornillo. Tabla 3.4

M24: $F_{t,Rd} = 0.9\cdot 353\cdot 1000/1.25$ N 254 kN

$F_{v,Rd} = 0.911\cdot 0.6\cdot 452\cdot 1000/1.25$ N 198 kN

M20: $F_{t,Rd} = 0.9\cdot 245\cdot 1000/1.25$ N 176 kN

$F_{v,Rd} = 0.878\cdot 0.6\cdot 314\cdot 1000/1.25$ N 133 kN

▪ Resistencia de TR solicitados a tracción y cortante: $F_{v,Ed}/F_{v,Rd}+F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd}\leq 1$

M24: 57/198 + 254/(1.4·254) = 1

M20: 38/133 + 176/(1.4·176) = 1

Conjunto de la unión

Sin considerar en el estado límite último rozamiento compresiones de contacto -unión solicitada en tracción compuesta- y distribuyendo las fuerzas en los tornillos con criterios plásticos:

	F_z (kN)	F_x (kN)	z (m)
TR fila superior	166↓	1016→	-0.0355↑
Eje de la pieza ----------			
TR fila inferior	273↓	345→	0.0405↑

V_{Rd} = $\sum F_z = 439$

N_{Rd} = $\sum F_x = 1361$

M_{Rd} = $\sum F_x\cdot z = -22.1$ kNm

$\lvert V_{Ed}/V_{Rd}\rvert =$	**0.854 < 1**		
$\lvert N_{Ed}/N_{Rd}\rvert =$		**0.855 < 1**	
$\lvert M_{Ed}/M_{N,V,Rd}\rvert =$			**0.855 < 1**

Comprobación alternativa:

	F_z (kN)	F_x (kN)	z (m)
TR fila superior	142↓	869→	-0.0355↑
Eje de la pieza ----------			
TR fila inferior	234↓	295→	0.0405↑

$V_{Rd} =$	$\sum F_z = 376$		
$N_{Rd} =$		$\sum F_x = 1164$	
$M_{Rd} =$			$\sum F_x \cdot z = -18.9$ kNm
$\lvert V_{Ed}/V_{Rd}\rvert =$	**1 ≤ 1**		
$\lvert N_{Ed}/N_{Rd}\rvert =$		**1 ≤ 1**	
$\lvert M_{Ed}/M_{N,V,Rd}\rvert =$			**1 ≤ 1**

Chapa frontal:

▪ Flexión: EN 1993-1-8:2005 tabla 6.6.

$W_{pl} = b_p t_p^2/4$, $M_{pl,Rd} = W_{pl,}f_{yd} = (1\cdot 35^2/4)\cdot 345/1.0$ Nmm/mm = 105.6 kNmm/mm, donde se ha tomado el límite elástico garantizado según UNE-EN-10025 para chapas de S275 con espesores entre 16 y 40 mm.

Por líneas de rotura:

1. $M_{Ed} \approx (2F_{t,Rd}+2F_{t,Rd}\cdot 27.6/103.6)/\kappa$
   $(2\cdot 254+2\cdot 176\cdot 27.6/103.6)/10.39 =$ 57.9 kN
2. $M_{Ed} \approx (2F_{t,Rd}+2F_{t,Rd})/\kappa$
   $(2\cdot 254+2\cdot 176)/12.33 =$ 69.7 kN
3. $M_{Ed} \approx (254+176)\cdot 20/171 =$ 50.3 kN
4. $M_{Ed} \approx \max(F_{t,Rd}/4\pi$ en int, $F_{t,Rd}/5$ en zonas voladas)
   50.8 kN

$M_{Ed}/M_{pl,Rd}$ **0.548<1**

Esquema del mecanismo 2:

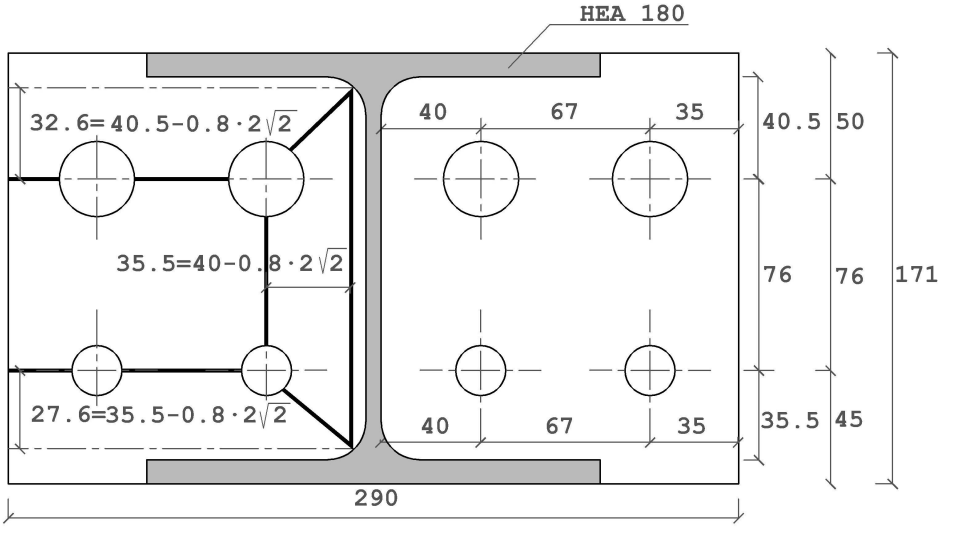


figura 35: Mecanismo de colapso de la chapa frontal

$\kappa = (p_y+m_y+e_y-2d_0)/m_z + (p_y+m_y+e_y-2d_0)/m_z + (p_z+m_z+m_z-d_0-d_0)/m_y + (p_z+m_z+m_z)/m_y$

$\kappa = (142-2\cdot26)/40.5 + (142-2\cdot22)/35.5 + (152-22-26)/40 + (152)/40 = 11.38$

(descontando $0.8\cdot a\cdot\sqrt{2}$)

$\kappa = (137.5-2\cdot26)/32.6+(137.5-2\cdot22)/27.6+(136.2-22-26)/35.5+(136.2)/35.5 = 12.33$

$W_{int} = M_{Ed}\cdot v\cdot\kappa$; $W_{ext} = (2F_{t,Rd}+2F_{t,Rd})v$; $W_{int} = W_{ext} \Rightarrow$

$M_{Ed} = (2F_{t,Rd}+2F_{t,Rd})/\kappa$

Mecanismo 1 (“tipo sobre” con charnela sobre la primera fila de TR)

$\kappa = (p_y+m_y+e_y-2d_0)/m_z + (p_y+m_y+e_y-2d_0)/(m_z+p_z) + (p_z+m_z+m_z- d_0)/m_y + (p_z+m_z+m_z)/m_y$

$\kappa = (142-2\cdot26)/40.5+(142-2\cdot26)/(35.5+76)+(152-26)/40+152/40 = 9.98$

(descontando $0.8\cdot a\cdot\sqrt{2}$)

$\kappa = (137.5-2\cdot26)/32.6+(137.5-2\cdot26)/(27.6+76)+(136.2-26)/35.5+136.2/35.5 = 10.39$

$W_{int} = M_{Ed}\cdot v\cdot\kappa$; $W_{ext} = (2F_{t,Rd}+2F_{t,Rd}\cdot27.6/103.6)v$; $W_{int} = W_{ext} \Rightarrow$

$M_{Ed} = (2F_{t,Rd}+2F_{t,Rd}\cdot27.6/103.6)/\kappa$

Notesé que el efecto de omitir en los cálculos los anchos de las soldaduras supone una variación de hasta un 8.3% en los resultados. En la unión analizada dicha variación es superflua, pero en situaciones extremas puede validar o invalidar un diseño.

▪ Resistencia a aplastamiento de la chapa frontal ($F_{b,Rd}$).
Reducción de $F_{b,Rd}$ por "unión larga" según el artículo 3.8:

M24: $L_j = 76$ $< 15d = 360$ $\beta_{Lf} = 1$
M20: $L_j = 76$ $< 15d = 300$ $\beta_{Lf} = 1$

Cálculo de $F_{b,Rd}$ según tabla 3.4 suponiendo $k_1 = 2.5$:
M24: $\alpha = \min [50/(3\cdot26), 76/(3\cdot26)-1/4, 1000/510, 1] =$ 0.641
$F_{bRd} = 2.5\cdot0.641\cdot24\cdot35\cdot510/1.25$ N = 549 kN (más favorable que $F_{V,Rd}$)
M20: Aplastamiento: $\alpha = \min [45/(3\cdot22), 76/(3\cdot22)-1/4, 1000/510, 1] = 0.682$
$F_{bRd} = 2.5\cdot0.682\cdot20\cdot35\cdot510/1.25$ N = 486 kN (más favorable que $F_{V,Rd}$)

ELS (categoría B) según EN 1993-1-8:2005

Pretensado y resistencia a deslizamiento. Artículos 3.6.1 y 3.9.1

M24: Esfuerzo de pretensado: $F_{p,C} = 0.7\cdot353\cdot1000$ N = 247 kN
$F_{s,Rd,ser} = 0.5\cdot0.7\cdot353\cdot1000/1.1$ 112 kN
M20: Esfuerzo de pretensado: $F_{p,C} = 0.7\cdot245\cdot1000$ N = 172kN
$F_{s,Rd,ser} = 0.5\cdot0.7\cdot245\cdot1000/1.1$ 78 kN

Solicitaciones de la unión respecto del CDG del conjunto de TR:

$M_{y,ser} = -13.5+831\cdot0.0044$ -10.3 kNm
$z_{CDG,TR} = (4\cdot353\cdot(-0.0355)+4\cdot245\cdot0.0405)/(4\cdot353+4\cdot245) =$ 0.0044 m

Esfuerzos exteriores actuantes sobre cada TR:
M24: $F_{x,ser} = 831\cdot0.0449/0.076/4+(10.3/0.076)/4$ 157 kN
M20: $F_{x,ser} = 831\cdot0.0311/0.076/4-(10.3/0.076)/4$ 51 kN

Conservadoramente no se aplicará a estas fuerzas de servicio el factor 0.8 que aparece en el artículo 3.9.2 de EN 1993-1-8:2005 para realizar la comprobación de ausencia de deslizamientos.

Descompresión:

M24: $F_{x,ser} /(F_{p,C} /1.1) = 157/(247/1.1) =$ **0.699<1**
M20: $F_{x,ser} /(F_{p,C} /1.1) = 51/(172/1.1) =$ **0.326<1**

(Por lo tanto en servicio no se descomprime la unión)

Rozamiento:

$V_{Rd,ser}$ = $(\mu\cdot4\cdot(247-157))+(\mu\cdot4\cdot(172-51))/1.1$
$(\mu\cdot4\cdot247)+(\mu\cdot4\cdot172)/1.1- \mu\cdot N_{E,ser}/1.1$ 384 kN

$|V/V_{Rd,ser}|$ = 269/384 **0.700<1**

(Por lo tanto en servicio no se producen deslizamientos).

6.3 EXPLICACIÓN DEL USO DEL LIBRO DE CÁLCULO DISPONIBLE EN http://catedracero.ee.upm.es, CON REFERENCIA AL MISMO EJEMPLO ANTERIOR.

6.3.1 Consideraciones generales

Las notas generales del apartado 2.3 son directamente aplicables a esta unión por lo que no se repiten.

6.3.2 Datos

Frente a las uniones analizadas previamente ahora el esfuerzo predominante es el axil, por lo que en el apartado "solicitaciones de primer orden" de la hoja DATOS se ha activado la celda en la que se introduce N_{Ed} (fondo verde claro).

La ficha está organizada para comprobar prioritariamente uniones trabajando a tracción. Sin embargo, con algunas consideraciones, pueden interpretarse fácilmente sus resultados incluso cuando N_{Ed} toma valores negativos. En este caso es obligado considerar en el análisis los efectos de segundo orden. Para tenerlos en cuenta, aunque sea de forma simplista, se ha activado la celda en la que se introduce el coeficiente de pandeo χ. A partir de éste se estima el momento M_{II} debido a los efectos de segundo orden de acuerdo con el apartado 5.1 de "Estructuras de edificación: análisis lineal y no lineal", Ariel, 2002.

En la sección "solicitaciones totales" de la hoja DATOS el valor de M_{Ed} se obtiene sumando al de primer orden el término M_{II}. Queda así justificado este apartado, común a todas las fichas aunque hasta aquí era superfluo pues en las uniones FB, F00B y F00BC el axil es nulo.

Se ha habilitado la celda t_c para introducir el espesor del refuerzo del alma contemplado en 6.2.

Como la unión está constituida únicamente por dos filas de tornillos en el apartado "distancias" las celdas en las que se introducía el número de

tornillos según la dirección z (n_z) se ha desactivado (el fondo de la celda ha pasado de verde claro a blanco) y fijado a 1.

El resto de explicaciones relativas a la hoja DATOS dadas en los apartados 3.3.2, 4.3.2 y 5.3.2 son directamente exportables al nuevo fichero. La figura siguiente es una imagen de la entrada de datos.

6.3.3 Resultados

La principal diferencia con las hojas anteriores se encuentra en la hoja NUDO, que se reestructura completamente respecto de la de las uniones FB, F00B y F00BC. Al concurrir en al sección los tres esfuerzos N, V y M el diagrama de interacción M/V se sustituye por las comprobaciones realizadas en el epígrafe "Comprobación del perfil base" del apartado 6.2.

En la hoja FB se comprueba la descompresión de la unión en el ELS, para lo cual se calcula una sección equivalente "fisurada" formada únicamente por los tornillos. Esta simplificación es totalmente coherente con los cálculos de las hojas anteriores, si el esfuerzo predominante es un esfuerzo axil de tracción. Cuando se utiliza el fichero para comprobar una unión comprimida, es evidente que no son significativas las comprobaciones de este apartado (salvo que el momento flector sea el esfuerzo prioritario carecerá por completo de sentido comprobar si se descomprime una unión comprimida). Se reitera que corresponde al usuario de las fichas su correcta interpretación según su criterio.

En la hoja DISTANCIAS se observa que junto al factor α que reduce $F_{b,Rd}$ se incluye $k_1/2.5$ (este factor estaba presente en todas las hojas anteriores, pero hasta aquí siempre era 1, o tan próximo a la unidad, que no se ha comentado). Con el nuevo parámetro k_1 se consideran las reducciones de $F_{b,Rd}$ cuando se superan los límites en la dirección perpendicular a la transmisión del esfuerzo (dirección "y" en las figuras) según la tabla 3.4 de EN 1993-1-8:2005. El factor reductor total se obtiene multiplicando los dos valores anteriores.

Esta comprobación no se realizó en el cálculo manual debido a su nula trascendencia en el estudio del conjunto.

Los modos de ruina que se comprueban en la chapa frontal son los mismos que los de las uniones previas.

Para obtener la distribución de esfuerzos en la hoja FB se sigue utilizando el algoritmo IP ya comentado. Cabe pensar que en este caso es

superfluo, pues la condiciones de equilibrio global ($\sum f_x = 0, \sum m_y = 0$), fijan los valores de las fuerzas horizontales en las dos filas de tornillos. Conocidas estas componentes la ecuación $F_{v,Ed}/F_{v,Rd} + F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd} \leq 1$ determina los valores máximos de cada F_v. Sin embargo, debe advertirse que esta solución sólo es válida si no llega a comprimirse el perfil, lo que no es improbable en presencia de un momento flector. Por esta razón se optó por mantener la formulación del resto de libros de cálculo.

CÁLCULO DE UNIONES FRONTALES F108

TITULO/CÓDIGO 060531

22/02/2007 hoja 2/6

Solicitaciones de primer orden:

N_{Ed}	V_{Ed}	$M_{Ed,y}$
1164	376	-16,9

Segundo orden:

X	1/X-1	(1/X-1)/(1/X)	M_y
0,86	0,16	1,17	0

Solicitaciones totales:

N_{Ed}	$V_{Ed,y}$	$M_{Ed,y}$
1164	376	-16,9

γ_{Vmax}	$N_{Ed,max}$	$V_{Ed,max}$	$M_{Ed,max}$
1,4	631	269	-54

Perfiles:

Acero:

id	f_y	f_u	γ_M	f_{yd}
S355	355	510	1	355

Soldaduras:

a_f	a_w
7	4

Perfil base:

id	h	b	A	A_{vz}	$W_{el,y}$	t_f	t_w	r	h_1	h_k
HE180A	171	180	45,25	14,47	324,9	9,5	6	15	152	241,17

Diagonal:

id	h	b	A	A_{vz}	$W_{el,y}$	t_f	t_w	r	h_1	h_k	α
HE100A	96	100	21,24	7,56	83,0	8,0	5	12	80	151,2	38

Refuerzo del alma:

t_k	hc	A
10	152	1520

Chapa frontal:

Acero:

id	f_y	f_u	γ_M	f_{yd}
S355	345	510	1	345

Geometría:

b	h	t	g	μ
300	171	20	75	0,5

TR:

Acero TR:

id	f_y	f_u	γ_{M0}	$\gamma_{M2,ser}$
A10.9	900	1000	1,25	1,1

TR fila 1:

id	d	d_0	A_s	A	$F_{t,Rd}$	$F_{t,ser}$	β_0	$F_{v,Rd}$	$F_{b,Rd}$	$F_{b,Rd,ser}$	$F_{b,Rd,max}$
M24	24	26	353	452	254	217	0,011	198	247	112	657

TR fila 2:

id	d	d_0	A_s	A	$F_{t,Rd}$	$F_{t,ser}$	β_0	$F_{v,Rd}$	$F_{b,Rd}$	$F_{b,Rd,ser}$	$F_{b,Rd,max}$
M20	20	22	245	314	176	151	0,078	133	172	78,2	714

Distancias:

TR fila 1:

id	n_b	e_1	p_1	m_b	n_1	e_2	p_2	m_2	$\Sigma(e_1, p_1)$	z
M24	4	35	67	40	1	50	76	40,5	--	-35,5

TR fila 2:

id	n_b	e_1	p_1	m_b	n_1	e_2	p_2	m_2		z
M20	4	35	67	40	1	45	76	35,5	--	40,5

Perfil base:

id	$z_{Ed,b}$	z_{cl}	z_{cu}
HE180A	0	0	85,5

Chk $\Sigma(e_1, p_1)$

--

Discretización del perfil base:

	b	h	z	f_{yd}	R
ala superior	180	9,5	-80,5	355	607
alma	6	38	-57,0	355	81
alma	6	38	-19,0	355	81
alma	6	38	19,0	355	81
alma	6	38	57,0	355	81
ala inferior	180	9,5	80,5	355	607

figura 36: Hoja DATOS particularizada para el diseño 6.2.

CÁLCULO DE UNIONES FRONTALES F106

TÍTULO/CÓDIGO 060531

22/02/2007 hoja 3/6

TR fila 1:

id	d	d_0		σ/σ_U	$\sigma/\sigma_U/2,5$	β_U
M24	24	26		1	0,48	1,00

distancias mínimas:

n_1	1	dirección 1	d'_{1min}	e_{1min}	p'_{1min}	p_{1min}	
e_1	50	>	78	32			(VÁLIDO)
p_1	76,0	>			98	55	(VÁLIDO)
n_2	4	dirección 2	d'_{2min}	e_{2min}	p'_{2min}	p_{2min}	
e_2	35,0	>	39	32			(VÁLIDO)
p_2	67,0	>			78	63	(VÁLIDO)

reducción de $F_{3,Rd}$ por aplastamiento

	α		α_{red}
1	0,64		0,64
0	0,72		
	$k_1/2,5$		$k_{1,red}$
0	0,81		0,75
4	0,75		
		$\sigma/\sigma_U/2,5=$	0,48

por maquinaria:

			m_{min}	β_{min}	
m_1	40,0	>	40		VÁLIDO
m_2	40,5	>	40		VÁLIDO
p_1	67,0	>		57	VÁLIDO
p_2	76,0	>		57	VÁLIDO

reducción de $F_{3,Rd}$ por "unión larga"

		L_{crit}	β_U
L_j	76,00	300	1,00

TR fila 2:

id	d	d_0		σ/σ_U	$\sigma/\sigma_U/2,5$	β_U
M20	20	22		1	0,68	1,00

distancias mínimas:

n_1	1	dirección 1	d'_{1min}	e_{1min}	p'_{1min}	p_{1min}	
e_1	45	>	66	27			(VÁLIDO)
p_1	76,0	>			83	49	(VÁLIDO)
n_2	4	dirección 2	d'_{2min}	e_{2min}	p'_{2min}	p_{2min}	
e_2	35,0	>	33	27			VÁLIDO
p_2	67,0	>			66	53	VÁLIDO

reducción de $F_{3,Rd}$ por aplastamiento

	α		α_{red}
1	0,68		0,68
0	0,90		
	$k_1/2,5$		$k_{1,red}$
2	1,00		1,00
2	1,00		
		$\sigma/\sigma_U/2,5=$	0,68

por maquinaria:

			m_{min}	β_{min}	
m_1	40,0	>	35		VÁLIDO
m_2	35,5	>	35		VÁLIDO
p_1	67,0	>		47	VÁLIDO
p_2	76,0	>		47	VÁLIDO

reducción de $F_{3,Rd}$ por "unión larga"

		L_{crit}	β_U
L_j	76,00	300	1,00

figura 5: Hoja DISTANCIAS particularizada para el diseño 6.2.

CÁLCULO DE UNIONES FRONTALES. F109

TÍTULO/CÓDIGO 060531

hoja 4/6

Comprobación del alma y las alas del perfil base sin rigidizadores:

Anchura reducida del ala del perfil base:

b_{fc}		100		
b_{fc} (alá)		102,5		
		0,976	< 1	VÁLIDO

Area reducida del alma del perfil base particularizada para a_w=0,7·t_{fb}

t_w/b_{fc}		800		
$t_w/b_{fc,t,ef}$ (alma)		879		
		0,910	< 1	VÁLIDO

Resistencia del perfil base:

$N_{t,Rd}$		1606,4		
n		0,725	< 1	VÁLIDO
$M_{v,c,Rd}$		115,3		
m		0,164	< 1	VÁLIDO

Comprobación de la interacción N/M:

a		0,244		
n+(1-0,5·a)·m		0,868	< 1	VÁLIDO
$M_{N,v,Rd}$		36,2		
$M_{N,v,Ed}/M_{N,v,Rd}$		0,522	< 1	VÁLIDO
$V_{c,v,Rd}$		296,6		
v		1,268	< 1	NO VÁLIDO

Considerando eficaz a cortante el 100% de la superficie de las alas del perfil base (hipótesis plausible debido a la posición tan próxima de la diagonal y la chapa frontal), resulta la siguiente comprobación:

$V_{c,v,Rd}$		927,4		
v		0,405	< 0,5	VÁLIDO

Resistencia del nudo con refuerzo de alma: #10

$N_{t,Rd}$		2146,0		
n		**0,542**	< 1	VÁLIDO
$V_{c,v,Rd}$		608,1		
v		**0,818**	< 1	VÁLIDO
$M_{v,c,Rd}$		135,8		
m		**0,139**	< 1	VÁLIDO

Comprobación de la interacción M/V:

$\rho=(2V_{Ed}/V_{v,Rd}-1)^2$		0,056		
si $V_{Ed}>0,5·V_{pl,Rd}$				
$M_{v,v,Rd}$		128,6		
$M_{v,Ed}/M_{v,v,Rd}$		0,147	< 1	VÁLIDO
m_V		0,946		
$1-m_V$		0,054		

Comprobación de la interacción M/N:

a		0,434		
$M_{N,v,Rd}$		79,4		
$M_{N,v,Ed}/M_{N,v,Rd}$		0,238	< 1	VÁLIDO
m_N		0,584		
$1-m_N$		0,416		

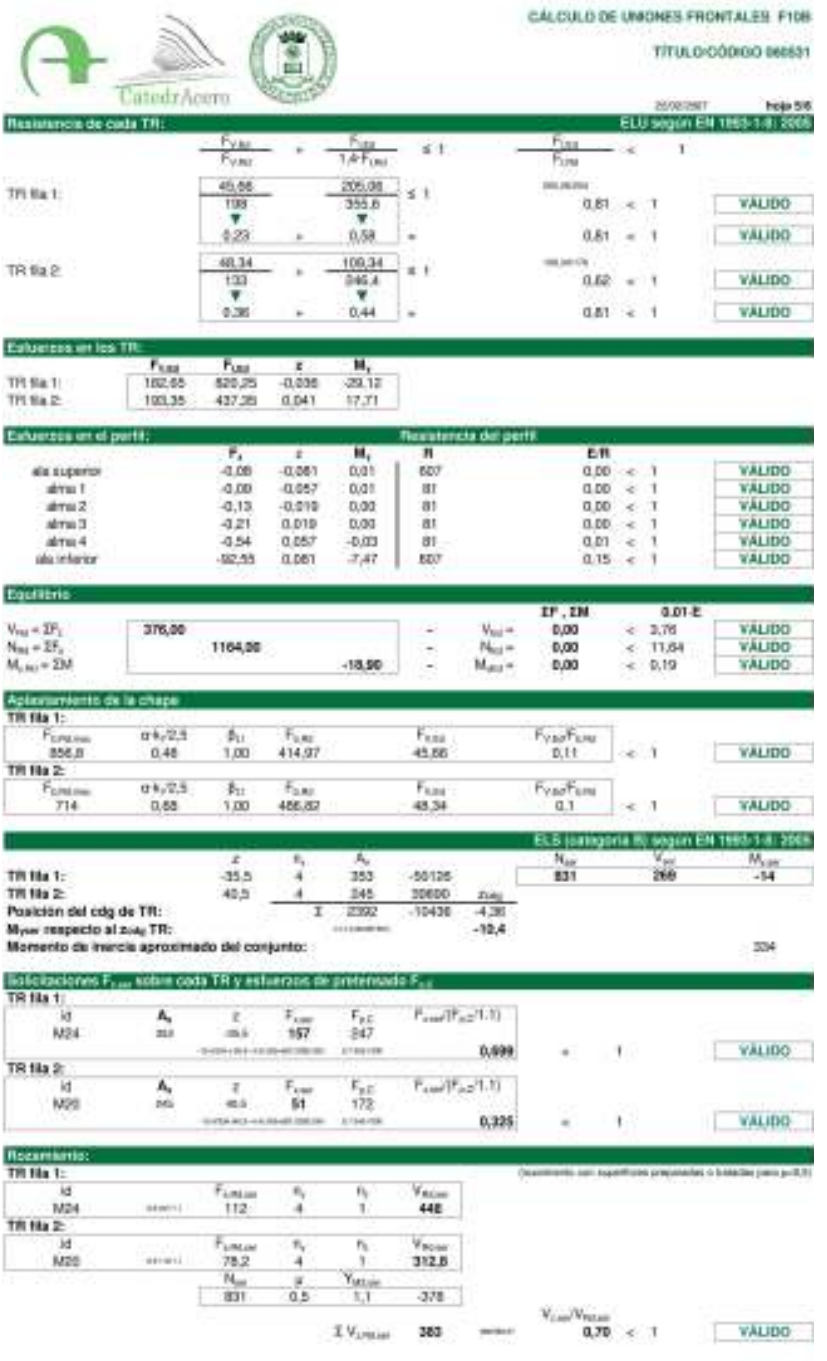
Comprobación de la interacción N/M/V

$M_{V,N,v,Rd}$		74,96		
$M_{v,Ed}/M_{V,N,v,Rd}$		0,252	< 1	VÁLIDO

Formula de interacción aproximada alternativa a la propuesta en EN 1993-1-1:2005 según el Anejo A3.3 del libro "Estructuras de Edificación: Análisis Lineal y No Lineal", Anaí 2008

$(n+(1-m_N)+(1-m_V)/m_N$		0,632	< 1	VÁLIDO
$M_{V,N,v,Rd}$		68,91		
$M_{v,Ed}/M_{V,N,v,Rd}$		0,274	< 1	VÁLIDO

figura 38: Hoja NUDO particularizada para el diseño 6.2.



CÁLCULO DE UNIONES FRONTALES F108

TITULO/CÓDIGO 666531

hoja 5/6

Resistencia de cada TR: — ELU según EN 1993-1-8: 2005

	$F_{v,Ed}/F_{v,Rd}$	+	$F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd}$	≤ 1	$F_{t,Ed}/F_{t,Rd}$	<	1	
TR fila 1:	45,66 / 199		205,08 / 355,6	≤ 1				
	▼ 0,23	+	▼ 0,58	=	0,81	<	1	VÁLIDO
	48,34 / 133	+	109,34 / 246,4	≤ 1				
TR fila 2:	▼ 0,36	+	▼ 0,44	=	0,81	<	1	VÁLIDO

Esfuerzos en los TR:

	$F_{t,Ed}$	$F_{v,Ed}$	z	M_y
TR fila 1:	162,65	520,25	-0,036	-29,12
TR fila 2:	193,35	437,35	0,041	17,71

Esfuerzos en el perfil: — **Resistencia del perfil**

	P_x	z	M_y	R	E/R			
ala superior	-0,08	-0,061	0,01	607	0,00	<	1	VÁLIDO
alma 1	-0,09	-0,057	0,01	81	0,00	<	1	VÁLIDO
alma 2	-0,13	-0,019	0,00	81	0,00	<	1	VÁLIDO
alma 3	-0,21	0,019	0,00	81	0,00	<	1	VÁLIDO
alma 4	-0,54	0,057	-0,03	81	0,01	<	1	VÁLIDO
ala inferior	-92,55	0,061	-7,47	607	0,15	<	1	VÁLIDO

Equilibrio

					ΣF , ΣM		0.01·E	
$V_{Ed} = \Sigma F_z$	376,00			-	V_{Ed} =	0,00	< 3,76	VÁLIDO
$N_{Ed} = \Sigma F_x$		1164,00		-	N_{Ed} =	0,00	< 11,64	VÁLIDO
$M_{y,Ed} = \Sigma M$			-18,90	-	M_{Ed} =	0,00	< 0,19	VÁLIDO

Aplastamiento de la chapa

TR fila 1:

$F_{b,Rd,min}$	α $k_1/2,5$	β_{b1}	$F_{b,Rd}$	$F_{v,Ed}$	$F_{v,Ed}/F_{b,Rd}$			
856,8	0,48	1,00	414,97	45,66	0,11	<	1	VÁLIDO

TR fila 2:

$F_{b,Rd,min}$	α $k_1/2,5$	β_{b1}	$F_{b,Rd}$	$F_{v,Ed}$	$F_{v,Ed}/F_{b,Rd}$			
714	0,68	1,00	486,82	48,34	0,1	<	1	VÁLIDO

ELS (categoría B) según EN 1993-1-8: 2005

	z	n_i	A_i			N_{ser}	V_{ser}	$M_{y,ser}$
TR fila 1:	-35,5	4	353	-50126		831	269	-14
TR fila 2:	40,5	4	345	39600	z_{cdg}			
Posición del cdg de TR:		Σ	2392	-10436	-4,36			
$M_{y,ser}$ respecto al z_{cdg} TR:					-10,4			
Momento de inercia aproximado del conjunto:								334

Solicitaciones $F_{v,ser}$ sobre cada TR y esfuerzos de pretensado $F_{p,C}$

TR fila 1:

Id	A_s	z	$F_{v,ser}$	$F_{p,C}$	$F_{v,ser}/(F_{p,C}/1.1)$			
M24	353	-35,5	157	247	0,699	=	1	VÁLIDO

TR fila 2:

Id	A_s	z	$F_{v,ser}$	$F_{p,C}$	$F_{v,ser}/(F_{p,C}/1.1)$			
M20	245	40,5	51	172	0,325	=	1	VÁLIDO

Rozamiento:

TR fila 1:

Id		$F_{v,Rd,ser}$	k_s	n_b	$V_{Rd,ser}$
M24		112	4	1	448

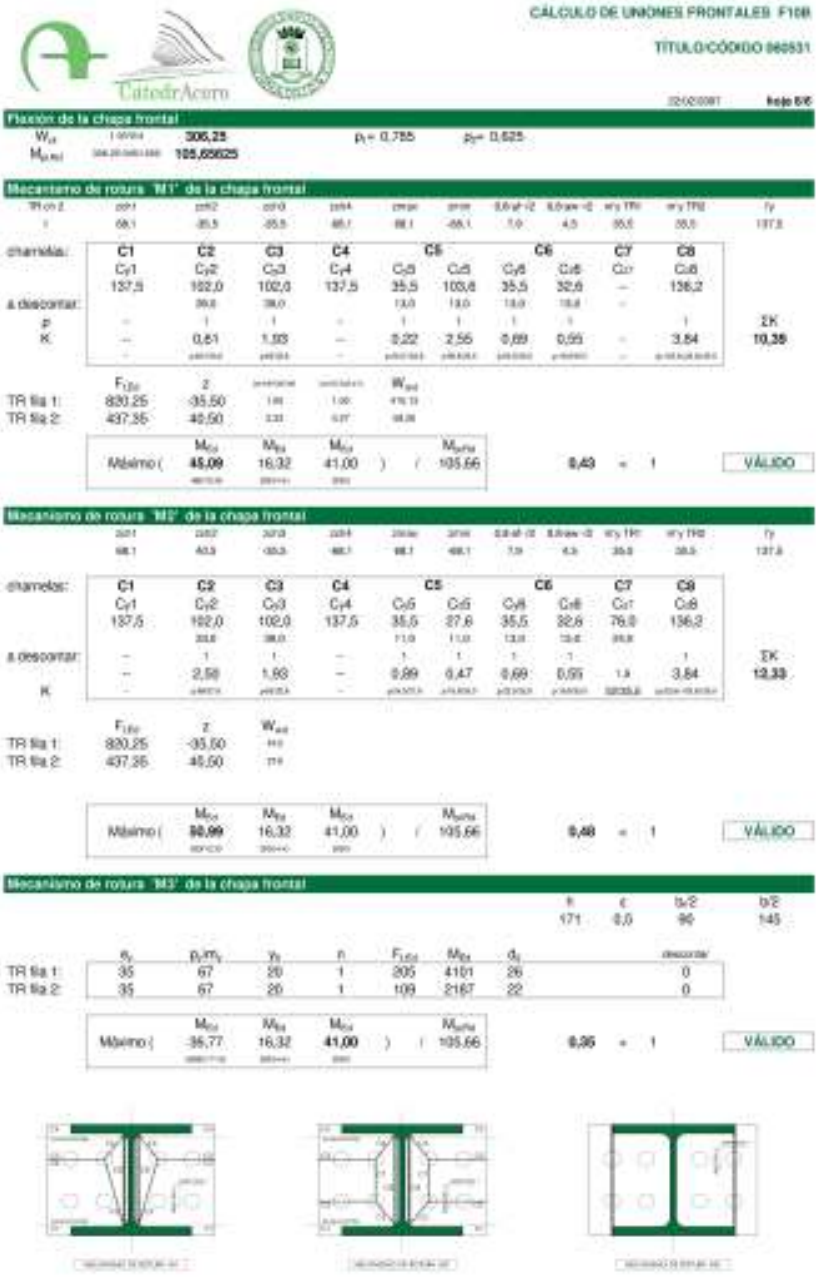
TR fila 2:

Id		$F_{v,Rd,ser}$	k_s	n_b	$V_{Rd,ser}$
M20		78,2	4	1	312,8

N_{ser}	μ	$\gamma_{M3,ser}$
831	0,5	1,1	-378

$\Sigma V_{v,Rd,ser}$ 383 — $V_{v,ser}/V_{Rd,ser}$ 0,70 < 1 VÁLIDO

figura 39: Hoja FB particularizada para el diseño 6.2.



CÁLCULO DE UNIONES FRONTALES F100

TITULO/CÓDIGO 060531

Hoja 6/6

Flexión de la chapa frontal

W_{el} 306,25 ρ_1= 0,755 ρ_2= 0,625

$M_{pl,Rd}$ 105,65625

Mecanismo de rotura 'M1' de la chapa frontal

TR en 2											
	68,1	-35,5	-35,5	68,1	68,1	-68,1	7,0	4,5	35,5	35,5	137,5
chaneles:	C1	C2	C3	C4	C5		C6		C7	C8	
	C_{y1}	C_{y2}	C_{y3}	C_{y4}	C_{y5}	C_{z5}	C_{y6}	C_{z6}	C_{z7}	C_{z8}	
	137,5	102,0	102,0	137,5	35,5	103,6	35,5	32,6	–	136,2	
a descontar:		38,0	38,0		13,0	13,0	13,0	13,0	–		
p	–	1	1	–	1	1	1	1		1	ΣK
K	–	0,61	1,33	–	0,22	2,55	0,69	0,55	–	3,84	10,39

	$F_{t,Ed}$	z			W_{el}
TR fila 1:	820,25	-35,50	1,00	1,00	476,13
TR fila 2:	437,35	46,50	0,37		98,28

	M_{c1}	M_{t1}	M_{c2}			$M_{pl,Rd}$			
Máximo (	45,09	16,32	41,00	)	/	105,66	0,43	=	1

VÁLIDO

Mecanismo de rotura 'M2' de la chapa frontal

	68,1	40,5	-35,5	68,1	68,1	-68,1	7,0	4,5	35,5	35,5	137,5
chaneles:	C1	C2	C3	C4	C5		C6		C7	C8	
	C_{y1}	C_{y2}	C_{y3}	C_{y4}	C_{y5}	C_{z5}	C_{y6}	C_{z6}	C_{z7}	C_{z8}	
	137,5	102,0	102,0	137,5	35,5	27,6	35,5	32,6	76,0	136,2	
		33,6	38,0		11,0	11,0	13,0	13,0	39,8		
a descontar:	–	1	1	–	1	1	1	1		1	ΣK
K	–	2,58	1,33	–	0,89	0,47	0,69	0,55	1,9	3,84	12,33

	$F_{t,Ed}$	z	W_{el}
TR fila 1:	820,25	-35,50	[illegible]
TR fila 2:	437,35	46,50	[illegible]

	M_{c1}	M_{t1}	M_{c2}			$M_{pl,Rd}$			
Máximo (	50,99	16,32	41,00	)	/	105,66	0,48	=	1

VÁLIDO

Mecanismo de rotura 'M3' de la chapa frontal

h	c	b/2	b'/2
171	0,0	90	145

	e_y	$p_y m_y$	y_i	n	$F_{t,Ed}$	M_{pl}	d_i		descontar
TR fila 1:	35	67	20	1	205	4101	26		0
TR fila 2:	35	67	20	1	109	2167	22		0

	M_{c1}	M_{t1}	M_{c2}			$M_{pl,Rd}$			
Máximo (	35,77	16,32	41,00	)	/	105,66	0,35	=	1

VÁLIDO

figura 40: Hoja CHAPA particularizada para el diseño 6.2.

6.4 RECOMENDACIONES SOBRE CONTROL DE CALIDAD

Es prioritario en las uniones traccionadas establecer controles fiables de los esfuerzos de pretensado reales de los tornillos: homologación del procedimiento de apriete en función del estado real de suministro de tornillos y tuercas, y control in situ de dicho estado real, ya que si el pretensado es defectuoso:

- Los estados límite de servicio se pueden ver comprometidos con riesgo de aberturas de la unión
- Los estados límite de servicio se pueden ver comprometidos con riesgo de deslizamientos, cuando las solicitaciones de tracción coexisten con esfuerzos cortantes elevados.
- Puede perjudicar incluso la seguridad ante los estados últimos (roturas de tornillos por aprietes inadecuados).

Actualmente no está extendido el uso de indicadores directos del esfuerzo de pretensado de cada tornillo, como pueden ser determinadas arandelas especiales usuales en el Reino Unido (A.Hayward, F.Weare: "Steel Detailers'Manual", Blackwell, London, 2002: fig.1.26; datos del principal fabricante constan en el texto citado).

Especialmente en el segundo caso habrá que prestar especial atención al estricto cumplimiento de los coeficientes de rozamiento especificados en el proyecto. Hay que tener en cuenta que el rozamiento se ve disminuido en toda la unión por las solicitaciones exteriores de tracción, (sin la contrapartida de su aumento en un "bloque comprimido" en este caso inexistente).

La resistencia de la chapa frontal normalmente en este tipo de uniones será crítica, por lo que frecuentemente será necesario adoptar chapas de espesores elevados. En tal caso convendrá especificar ensayos ultrasónicos complementarios de ausencia de "defecto de hoja" (cuestión que no deja de ser importante aun estando el espesor de las chapas "cosido" por los tornillos), así como procedimientos apropiados de soldadura del perfil a la chapa en taller.

Si es necesario disponer más de dos tornillos por fila las uniones anchas resultantes son relativamente susceptibles de desajustes de las superficies en contacto. Deberán especificarse las tolerancias de huelgos admitidos, y prever soluciones para posibles huelgos excesivos (dentro de un orden) cuando pudieran comprometer la seguridad y/o la durabilidad de la unión, por ejemplo mediante forros o "peines" incluidos a posteriori (EAE, M.F., 2006: 76.7 y 80;

prEN 1090-2:2006-10, artículo 8.1).

Se recomienda la preparación de bordes representada en los detalles de soldadura del ala superior del perfil a la chapa frontal. Su fundamentación puede consultarse en EAE, M.F. 2006: artículo 59.6 y en antigua UNE-ENV 1993-1-1, AENOR Dic.96: artículo 6.6.3 (3) y figura.6.6.5.

7 UNIONES ATORNILLADAS FRONTALES SOLICITADAS A CORTANTE + TRACCIÓN + FLEXIÓN, TIPO F20B.

7.1 DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN.

Se resuelve el embrochalamiento de dos familias de celosías, diseñadas con criterios en la actualidad generalmente considerados idóneos para los rangos de luces y solicitaciones medias-altas en edificación ya conocidos:

- Utilización de perfiles abiertos de las series H, de radios de giro adecuados, y accesibles en todas sus caras, tanto para la realización de las uniones en taller y en obra, como para su inspección y control.
- Nudos mayoritariamente sin cartelas, aplicando los criterios al respecto del Eurocódigo 3.
- Utilización de acero S355, cuyo elevado límite elástico se aprovecha íntegramente con este tipo estructural, raramente condicionado por los estados límite de servicio, si las relaciones canto/luz son apropiadas. La reducción conseguida de las cuantías de acero estructural compensa muy sobradamente el pequeño incremento de precio unitario en origen, y no debería perturbar la programación de los pedidos, que hay que presuponer racionalmente organizados en las obras de elevado tonelaje.
- Uniones in situ atornilladas, con las especificidades de su cálculo que se detallan en este ejemplo.

Frente a la unión estudiada en el capítulo anterior ésta queda peraltada por la cara superior del perfil. No conserva el alzado del perfil base que, como se indicaba en 6.1, era una de las bondades de la unión F10B. Este inconveniente puede convertirse en virtud en algunos diseños, como los descritos en el apartado 3.1 en los cuales las vigas secundarias (B) son vigas en celosía. Ya se indicó que descolgando esta familia por debajo de la superficie de cubierta una distancia igual al canto de las correas (P), existe compatibilidad geométrica entre las distintas familias de vigas en flexión. Además, debido a las mayores solicitaciones de las celosías de la familia principal (P) el canto de los perfiles de sus cordones es mayor que el de los cordones de la familia secundaria (B). Con la unión F20B esta nueva dificultad geométrica se resuelve fácilmente

soldando en taller una chapa frontal a las alas del perfil de la familia principal (P), sobre la cual se atornilla la chapa de la unión que ahora se estudia. La comprobación de esta chapa soldada al cordón de las vigas principales no esta contemplada en este texto, si bien, su análisis puede realizarse siguiendo los pasos de cualquiera de las aquí contempladas. Las advertencias relativas a las soldaduras en los extremos de las chapas frontales, especialmente cuado la solicitación predominante del perfil base es un tracción, son extensibles estos elementos.

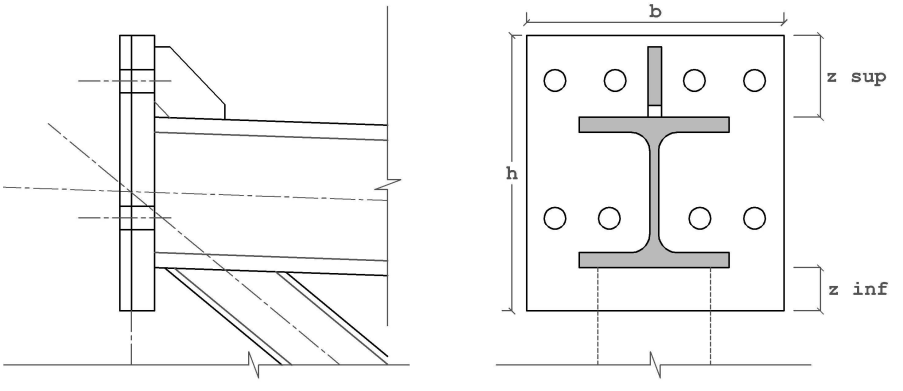


figura 41: Unión atornillada frontal. Disposición F20B

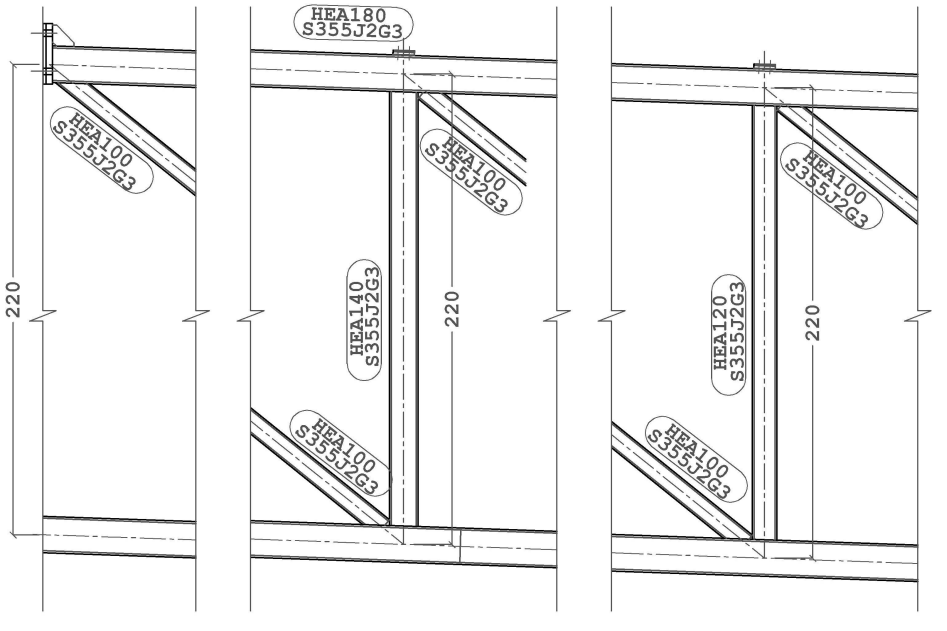


figura 42: Celosía continua

7.2 EJEMPLO NUMÉRICO DESARROLLADO.

En este apartado se desarrollan los cálculos para la unión particular que se describe a continuación. La mayoría de los comentarios a estos cálculos, comunes al resto de uniones que se estudian en otros capítulos, pueden encontrarse en el apartado 2.2.

F20B HEA 180 (S355)

TORNILLOS			
A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1) Superficies preparadas y/o tratadas para $\mu \geq 0.5$ (EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejoG)			
El par de apriete para tornillos de alta resistencia (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento.			
Valores característicos (N/mm^2)		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 1000$	$f_{yb} = 900$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1.25$

Definición de la Unión: F20B HEA 180 (S355)			
Chapa frontal S355J2G3 Control ultrasónico específico según UNE 36100 y 7278 al grado B			Calzo/forro para tolerancia S355J2G3
# 310·335·30 Ala superior ◢◣ 7 Alma ◢◣ 4 Ala inferior ◢◣ 7			$g \leq 15$ mm.
Tornillos superiores		**Tornillos inferiores**	
Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)	Tornillos A10.9 ($\mu = 0.5$)	Distancias (mm)
2M27 (taladros ϕ 30)	$m_y = 42.5$ $m_z = 58$	4M27 (taladros ϕ 30)	$e_y = 35$ $m_y = 47$ $p_y = 70$ $m_z = 57.5$
Cartelas cortadas según detalle Ala perfil base ◢◣ 7 Chapa frontal: Dos opciones equivalentes: ◢◣ 7 o PC			#15·85·85

La comprobación de esta unión constituye un ejemplo idóneo por su

generalidad, dentro de las estructuras planas, ya que incluye simultáneamente las tres categorías de esfuerzos posibles (N, V, M), y en una configuración (tracción compuesta + esfuerzo cortante elevado) que requiere un análisis especialmente cuidadoso de todos y cada uno de los aspectos del cálculo de este tipo de uniones.

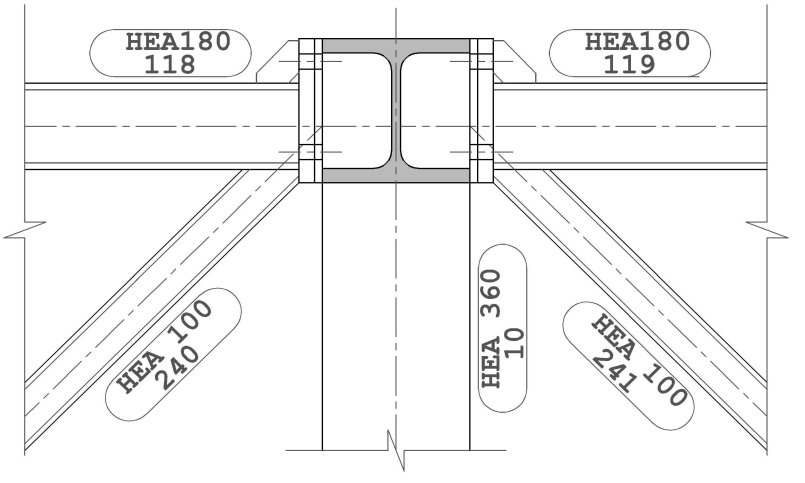


figura 43:Unión frontal F20B. Numeración de barras

Se indican seguidamente los esfuerzos evaluados mediante un modelo convencional de estructuras de barras:

Barra	118	α = -0.45º		240	β = 35.5º	
	N (t)	V (t)	M (mt)	N	V	M
Hipótesis						
CP	44.905	0.671	-1.478	32.320	-0.023	-0.116
SC	12.340	0.185	-0.407	8.852	-0.006	-0.032
W	-14.200	-0.102	-0.008			
ux2	0.054	-0.001	-0.001	-0.084	0.000	0.000
uz5	1.337	0.000	-0.006	0.140	-0.000	-0.001
	N_{Ed} (kN)	V_{Ed}(kN)	M_{Ed} (kNm)	N_{Ed} (kN)	V_{Ed}(kN)	M_{SEd} (kNm)
	810	12	-26	570	-0.4	-2.0

Combinación de acciones: Valor de cálculo de los efectos de las acciones
(1.35·44.905+1.5·12.340+1.5·0.6·0.054+1.35·1.337 = 81 t)

Solicitaciones de la unión:

N_{Ed} = 810 cosα-12 senα+570 cosβ-(-0.4) senβ	1274 kN
$V_{z,Ed}$ = 810 senα+12 cosα+570 senβ+(-0.4) cosβ	337 kN
$M_{y,Ed}$ =	(-)28 kNm

Se admite una redistribución de M del 30 %, por ser de pequeña magnitud, de carácter exclusivamente hiperestático (ejes concurrentes) y por tratarse de barras traccionadas:

$M_{y,Ed}$ =	(-)19.6 kNm

Comprobación aproximada "manual" para una carga superficial mayorada media ($\gamma_{f,med}$ = 1.4, p_{med} = 1.9 kN/m^2), en función de la separación (s = 7.5 m), luz (L = 36 m) y canto (h = 2.2m) de las piezas:

$\gamma_{f,med}\cdot p_{med}\cdot sL^2/10h \approx (1.4\cdot 1.90\cdot 7.5\cdot 36^2/10)/2.2$	1175 kN
$\gamma_{f,med}\cdot p_{med}\cdot sL/2 \approx 1.4\cdot 1.90\cdot 7.5\cdot 36/2$	359 kN

Obsérvese que los esfuerzos del modelo de análisis se cotejan con una aproximación "robusta" e "independiente" de los modelos informáticos, que obviamente no sustituye a los valores "bien calculados", pero que en su caso habría permitido detectar posibles errores que inevitablemente se producen a veces en los mismos.

En suma:

N_{Ed} =	1274 kN	γ_f = 1.4	N_{ser} =	910 kN
$V_{z,Ed}$ =	337 kN		$V_{z,ser}$ =	241 kN
$M_{y,Ed}$ =	(-)19.6 kNm		$M_{y,ser}$ =	-14 kNm

Comprobación del perfil base: HEA 180 (S355) según EN 1993-1-1:2005 y EN 1993-1-8:2005

Nudo extremo de la cercha. Dimensiones eficaces según EN 1993-1-8:2005:

Nudo sin rigidización con diagonal HEA100 traccionada. Artículos de EN 1993-1-8:2005 4.10 y 6.2.6.3 particularizados para el ala del cordón (t_f, t_w, r), y la diagonal (t_{fb}), suponiendo está soldada con dos cordones de ángulo de garganta $0.7\cdot t_{fb}$:

$b_{eff} = t_w+2r+7t_f$ =	102.5 mm ≥ b_{fb} = 100 mm
$t_w\cdot[3t_{fb}+5(r+t_f)]$	879 mm^2 ≥ $b_{fb,}t_{fb}$ = 800 mm^2

Luego el alma del HEA 180 no requiere rigidizadores verticales en el nudo.

Resistencia del perfil base según EN 1993-1-1:2005

▪ Tracción y flexión pura. Artículos 6.2.3 y 6.2.5:

$N_{pl,Rd} = 4525 \cdot 355 \cdot 10^{-3}$ 1606 kN

$M_{y,pl,Rd} = 324900 \cdot 355 \cdot 10^{-6}$ 115.3 kNm

$N_{Ed}/ N_{pl,Rd}$ **0.793<1**

$M_{y,Ed}/ M_{y,pl,Rd}$ **0.170<1**

▪ Interacción N-M en secciones I o H traccionadas. Artículo 6.2.9.1 (5):

$a = \min(0.5, (A-2 \cdot b \cdot t_f)/A$ 0.244

$N_{Ed}/ N_{pl,Rd} + (1-0.5 \cdot a) \cdot M_{y,Ed}/ M_{y,pl,Rd}$ **0.942<1**

▪ Esfuerzo cortante. Artículo 6.2.6:

$V_{z,pl,Rd} = 1447 \cdot 355 \cdot 10^{-3}/\sqrt{3}$ 297 kN

$V_{z,Ed}/V_{z,pl,Rd}$ **1.136>1**

NO VALIDO

De donde se deduce la necesidad de acartelar el nudo (o refuerzo equivalente). Por otra parte, el ala inferior de la diagonal está soldada tan cerca de la chapa frontal que pueden considerarse eficaces a cortante el 100 % de las alas de la HEA180, con lo que $V_{z,pl,Rd} = 4525 \cdot 355 \cdot 10^{-3}/\sqrt{3} = 927$ kN; $V_{z,Ed}/ V_{z,pl,Rd} = 0.363 < 0.5$.

Resistencia del perfil acartelado (ver detalle):

Descontando el ojal, se añade un rectángulo de ancho 15 y alto 85 mm:

$N_{pl,Rd} = (4525+15 \cdot 85) \cdot 355 \cdot 10^{-3}$ 2059 kN

$V_{z,pl,Rd} = (1447+15 \cdot 85) \cdot 355 \cdot 10^{-3}/\sqrt{3} =$ 558 kN

$M_{y,pl,Rd} = (325000-(15 \cdot 85) \cdot 6/4+(15 \cdot 85) \cdot (171/2+85/2)) \cdot (355) \cdot 10^{-6} =$

172.6 kNm

Valor exacto siempre que el área del refuerzo sea inferior al del alma del perfil. Cuando esta condición no se cumpla puede tomarse un espesor efectivo del refuerzo t_{eff} de forma que su área no supere a la del alma del perfil. Conservadoramente se ha despreciado el ojal.

$n = N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ **0.619<1**

$v = V_{z,Ed}/V_{z,pl,Rd}$ **0.604<1**

$m = M_{y,Ed}/M_{y,pl,Rd}$ **0.114<1**

▪ Interacción M-V. Artículo 6.2.8:

$\rho = (2 \cdot V_{Ed} /V_{pl,Rd}-1)^2 = (2 \cdot 337/557.9-1)^2$ $\rho = 0.043$

(con $V_{Ed} > 0.5 \cdot V_{pl,Rd}$)

$M_{v,Rd} = M_{pl,Rd} - (\rho \cdot A_v^2/(4 \cdot t_w) \cdot f_{yd}) =$

$172.6-0.043 \cdot (14.47 \cdot 100+15 \cdot 85)^2/4/6 \cdot 355 \cdot 10^{-6} =$ 167.9kNm

$m_v = M_{v,Rd}/M_{y,pl,Rd}$ $= 167.9/172.6 =$ 0.973

1- m_v = perdida de resistencia a flexión por interac. M/V 0.027

▪ Interacción M-N. Artículo 6.2.9.1 (5):

$M_{N,y,Rd} = M_{y,pl,Rd}(1-N_{Ed}/N_{pl,Rd})/(1-0.5 \cdot a)$ 75.0 kNm

Donde conservadoramente se ha tomado para el parámetro "a" el mismo valor obtenido previamente para el perfil sin acartelar (a = 0.244).

$m_N = M_{N,y,Rd}/M_{y,pl,Rd}$ 0.434

1-m_N = pérdida de resistencia a flexión por interac. M/N 0.566

▪ Interacción N-M-V según EN 1993-1-1:2005 6.2.10(3)

$M_{V,N,y,Rd} = M_{N,y,Rd} \cdot (1- \rho) =$ 71.7 kNm

$M_{y,Ed}/ M_{V,N,y,Rd} = 19.6/71.7$ **0.273<1**

▪ Fórmula de interacción N-M-V aproximada, independiente de la de EN 1993-1-1:2005, tomada del Anejo A3.3 de "Estructuras de edificación: análisis lineal y no lineal", Ariel, 2002:

$m+(1-m_V)+(1-m_N)/m_V \leq 1$

0.114 + 0.027 + 0.566/0.973 **0.723<1**

O bien, de manera equivalente:

$M_{V,N,y,Rd} = [m_V-(1-m_N)/m_V]M_{y,pl,Rd}$

$M_{V,N,y,Rd} =$ $= (0.973-0.566/0.973) \cdot M_{y,pl,Rd} =$ 67.5 kNm

$M_{y,Ed}/M_{V,N,y,Rd}$ $= 19.6/67.5$ **0.291<1**

Fórmulas ad hoc del tipo m_V $m_N \cdot M_{y,pl,Rd}$, ó $[1-(1-m_V)-(1-m_N] \cdot M_{y,pl,Rd}$, pueden ser contrarias a la seguridad.

ELU según EN 1993-1-8:2005

Cálculos preliminares:

▪ Reducción de $F_{v,Rd}$ por forros. Artículo 3.6.1 (12):

M27: $\beta_p = 9 \cdot 27/(8 \cdot 27+3 \cdot 15)$ $\beta_p = 0.931$

▪ Resistencia de cálculo de cada tornillo. Tabla 3.4

M27: $F_{t,Rd} = 0.9 \cdot 459 \cdot 1000/1.25$ N 330 kN

$F_{v,Rd} = 0.931 \cdot 0.6 \cdot 573 \cdot 1000/1.25$ N 256 kN

▪ Resistencia de TR solicitados a tracción y cortante: $F_{v,Ed}/F_{v,Rd}+F_{t,Ed}/1.4F_{t,Rd} \leq 1$

M27: $73/256 + 330/(1.4 \cdot 330) =$ 1

TR sup.: $116/256 + 174/(1.4 \cdot 330) =$ 0.830

TR inf.: $52.3/256 + 330/(1.4 \cdot 330) =$ 0.919

Conjunto de la unión

Sin considerar en el estado límite último rozamiento ni compresiones de contacto -unión solicitada en tracción compuesta- y distribuyendo las fuerzas en los tornillos con criterios plásticos:

	F_z (kN)	F_x (kN)	z (m)
TR fila superior	232↓	348→	-0.1435↑
Eje de la pieza ----------			
TR fila inferior	209↓	1320→	0.0185↑
V_{Rd} =	$\sum F_z = 441$		
N_{Rd} =		$\sum F_x = 1668$	
M_{Rd} =			$\sum F_x \cdot z = -25.5$ kNm
$\lvert V_{Ed}/V_{Rd}\rvert$ =	**0.764 < 1**		
$\lvert N_{Ed}/N_{Rd}\rvert$ =		**0.764 < 1**	
$\lvert M_{Ed}/M_{NV,Rd}\rvert$ =			**0.768 < 1**

Comprobación alternativa

	F_z (kN)	F_x (kN)	z (m)
TR fila superior	177↓	267→	-0.1435↑
Eje de la pieza ----------			
TR fila inferior	160↓	1008→	0.0185↑
V_{Rd} =	$\sum F_z = 337$		
N_{Rd} =		$\sum F_x = 1274$	
M_{Rd} =			$\sum F_x \cdot z = -19.67$ kNm
$\lvert V_{Ed}/V_{Rd}\rvert$ =	**1 ≤ 1**		
$\lvert N_{Ed}/N_{Rd}\rvert$ =		**1 ≤ 1**	
$\lvert M_{Ed}/M_{NV,Rd}\rvert$ =			**0.996 < 1**

Al estar traccionados todos los tornillos, y especialmente para uniones no simétricas, es importante ajustar la posición de la fuerza resultante con la de la solicitación exterior. No basta con obtener una distribución de esfuerzos internos que cumpla individualmente los límites $0 \le N_{Ed}/N_{Rd} \le 1$, $0 \le M_{Ed}/M_{Rd} \le 1$ (y $\lvert V_{Ed}/V_{Rd}\rvert \le 1$), ya que son posibles diagramas de interacción N-M como el de la figura: es factible encontrarse fuera del dominio válido aunque se obtengan N_{Rd} y M_{Rd} (punto R) de mayor valor absoluto y de igual signo que N_{Ed} y M_{Ed} (punto E). Una condición suficiente para que esto no suceda es que los puntos E y R se encuentren aproximadamente sobre una misma recta que pase por el origen (N = 0, M = 0).

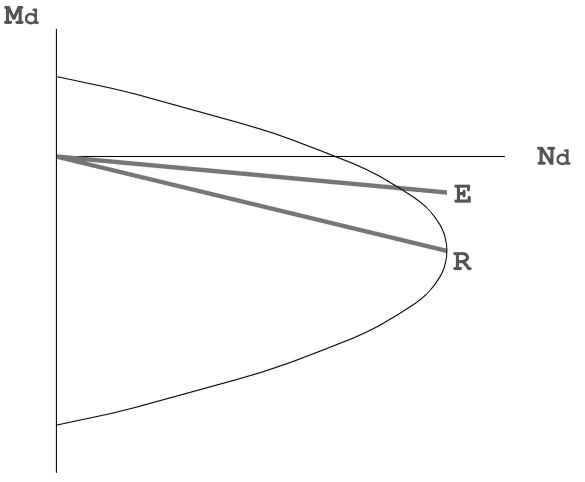


figura 44: Diagrama de interacción N/M

Con sólo dos filas de tornillos ($1 \leq i \leq 2$), siendo $F_{i,Rd}$ la suma de las $F_{t,Rd}$ de los tornilos de cada fila, y suponiendo todos los tornillos traccionados, es decir, con la excentricidad $e_{Ed} = M_{Ed}/N_{Ed}$ interior al intervalo limitado por z_1 y z_2 ("tracción compuesta") este problema se puede resolver de la forma siguiente:

$$N_{Ed}/\sum F_{xi} = E/R = M_{Ed}/\sum F_{xi,}z_i \qquad \text{con} \qquad F_{xi} \leq F_{i,Rd},$$

de donde se deduce que el "coeficiente de utilización" de la unión (E/R), salvo que la comprobación de cortante sea más desfavorable, viene dado por:

$$E/R = N_{Ed} / \min^{o}\{ F_{i,Rd}\cdot(2z_i-z_1-z_2)/(e_{Ed}+z_i-z_1-z_2),\ 1 \leq i \leq 2\}$$

Así, en el mismo ejemplo anterior, se obtiene: E/R = **0.768 < 1**

El caso de más de dos filas de tornillos, todos ellos traccionados, también admite una solución explícita, si la comprobación de cortante no es condicionante, cuando se pueda suponer que todas las filas, salvo una sola de ellas (la número j en la sumatoria siguiente) agotan en el estado último su capacidad resistente respectiva:

$$E/R = N_{Ed} / \sum_{i\neq j} F_{i,Rd}\cdot(z_i-z_j)/(e_{Ed}-z_j)$$

Otros casos más complejos se pueden resolver con la hoja de cálculo descrita en el apartado 7.3

Chapa frontal:

▪ Flexión: EN 1993-1-8:2005 tabla 6.6.

$W_{pl} = b_p t_p^2/4$, $M_{pl,Rd} = W_{pl,}f_{yd} = (1\cdot 30^2/4)\cdot 345/1.0$ Nmm/mm = 77.6 kNmm/mm, donde se ha tomado el límite elástico garantizado según UNE-EN-10025 para chapas de S275 con espesores entre 16 y 40 mm.

Por líneas de rotura:

1. $M_{Ed} \approx 2F_{t,Rd}/\kappa = 2\cdot 330/9.30$ 71.0 kN
2. $M_{Ed} \approx \max(F_{t,Rd}/4\pi$ en int, $F_{t,Rd}/5$ en zonas voladas) 65.6 kN

$M_{Ed}/ M_{pl,Rd}$ 71.0/77.6 **0.915<1**

Esquema del mecanismo 1:

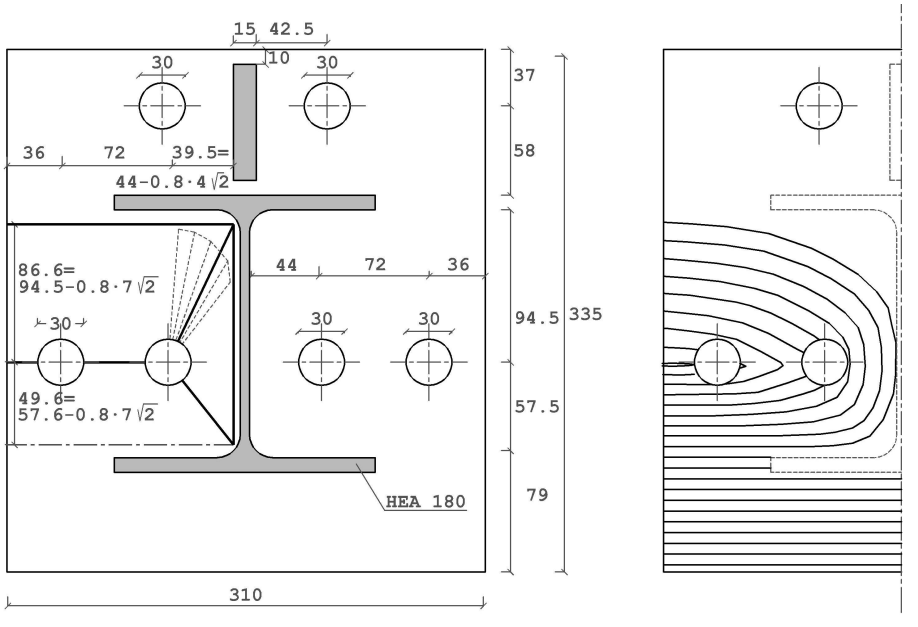


figura 45: Mecanismo de colapso de la chapa frontal

$\kappa = (2\cdot 108-1.5\cdot 30)/94.5 + \rho[(2\cdot 44-30/2)/94.5+(2\cdot 94.5-30/2)/44] + (2\cdot 57.5 - 30/2)/44 + (152-2\cdot 30)/57.5 =$ 9.39

$\rho \approx \pi/4 = 0.785$

(descontando $0.8\cdot a\cdot\sqrt{2}$)

$\kappa = (2\cdot 108-1.5\cdot 30)/86.6 + \rho\cdot[(2\cdot 39.5-30/2)/86.6 +(2\cdot 86.6-30/2)/39.5] + (2\cdot 49.6 - 30/2)/39.5 + (147.5-2\cdot 30)/49.6 =$ 9.59

$\rho \approx \pi/4 = 0.785$

$W_{int} = M_{Ed}\cdot v\cdot\kappa$; $W_{ext} = 2\cdot F_d\cdot v$; $W_{int} = W_{ext} \Rightarrow$ $M_{Ed} = 2F_d/\kappa$

Como en la unión del capítulo anterior el efecto de omitir en los cálculos los anchos de las soldaduras supone una variación superflua para el diseño considerado, pero en situaciones extremas puede validarlo o invalidarlo.

El coeficiente ρ aplicado a los términos del trabajo virtual interno (W_{int}) relativos al cuadrante superior del mecanismo de colapso simplista supuesto (línea gruesa en la figura), corrige dichos términos con respecto a otras configuraciones más desfavorables (líneas radiales en la figura). Su valor aproximado ($\pi/4$) se deduce para un teórico problema simétrico respecto de la línea de centros de tornillos y tres bordes empotrados, comparando el trabajo interno que se obtiene sustituyendo las líneas de rotura radiales por una distribución semicónica de charnelas. En la parte derecha de la figura se ha representado el mecanismo de colapso "exacto" para las condiciones de contorno postuladas. Se ha calculado mediante un algoritmo numérico obteniéndose $\kappa = 10.06$ para una discretización de la chapa en ambas direcciones de 1mm.

▪ Resistencia a aplastamiento de la chapa frontal ($F_{b,Rd}$).
Reducción de $F_{b,Rd}$ por "unión larga" según el artículo 3.8:
M27: $L_j = 162$ $< 15d = 405$ $\beta_{Lf} = 1$

Cálculo de $F_{b,Rd}$ según tabla 3.4 suponiendo $k_1 = 2.5$:
M27 sup: $\alpha = \min[37/(3\cdot30), 162/(3\cdot30)-1/4, 1000/510, 1] = 0.411$
$F_{b,Rd} = 2.5\cdot0.411\cdot27\cdot30\cdot510/1.25$ N = 340 kN (más favorable que $F_{v,Rd}$)
M27 inf: $\alpha = \min[136/(3\cdot30), 162/(3\cdot30)-1/4, 1000/510, 1] = 1$
$F_{b,Rd} = 2.5\cdot1\cdot27\cdot30\cdot510/1.25$ N = 826 kN (más favorable que $F_{v,Rd}$)

ELS (categoría B) según EN 1993-1-8:2005

Pretensado y resistencia a deslizamiento. Artículos 3.6.1 y 3.9.1
M27: Esfuerzo de pretensazo: $F_{p,C} = 0.7\cdot459\cdot1000$ N = 321 kN
$F_{s,Rd,ser} = 0.5\cdot0.7\cdot459\cdot1000/1.1$ 146 kN

Solicitaciones de la unión respecto del CDG del conjunto de TR:

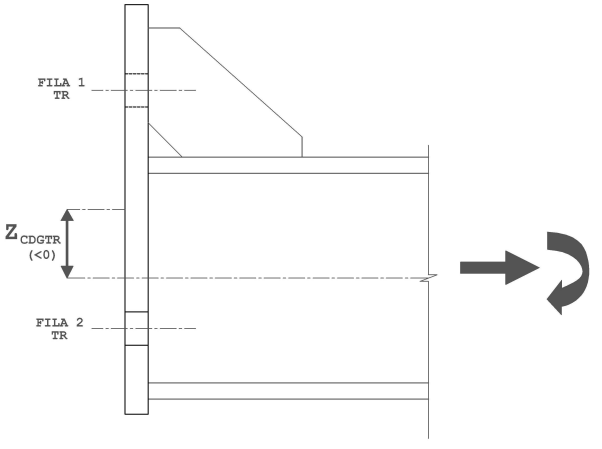


figura 46: Posición relative del CDG de los tornillos y del CDG del perfil base

$M_{y,ser}$ = -14+910·0.0355 18.3 kNm

$z_{CDG,TR}$ = (2·(-0.1435)+4·0.0185)/6 = -0.0355

Esfuerzos exteriores actuantes sobre cada TR:

M27 sup: $F_{x,ser}$ = 910/6-(18.3/0.162)/2 95 kN

M27 inf: $F_{x,ser}$ = 910/6+(18.3/0.162)/4 180 kN

Conservadoramente no se aplicará a estas fuerzas de servicio el factor 0.8 que aparece en el artículo 3.9.2 de EN 1993-1-8:2005 para realizar la comprobación de ausencia de deslizamientos.

Descompresión:

M27 sup: $F_{x,ser}$ /($F_{p,C}$ /1.1) = 95/(321/1.1) = **0.326<1**

M27 inf: $F_{x,ser}$ /($F_{p,C}$ /1.1) = 180/(321/1.1) = **0.617<1**

(Por lo tanto en servicio no se descomprime la unión)

Rozamiento:

$V_{Rd,ser}$ = (μ·2·(321-180))+(μ·4·(321-95))/1.1

= (μ·2·321)+(μ·4·321)/1.1- μ· N_{ser}/1.1 462 kN

|V/$V_{Rd,ser}$| = 241/462 **0.521<1**

(Por lo tanto en servicio no se producen deslizamientos).

7.3 EXPLICACIÓN DEL USO DEL LIBRO DE CÁLCULO DISPONIBLE EN http://catedracero.ee.upm.es, CON REFERENCIA AL MISMO EJEMPLO ANTERIOR.

7.3.1 Consideraciones generales

Las notas generales del apartado 3.3.1 son directamente aplicables a esta unión por lo que no se repiten.

7.3.2 Datos y resultados

La única diferencia en la hoja DATOS, respecto a la de las uniones F10B, se encuentra en que se sustituye la definición del refuerzo del alma por la de la cartela. La figura siguiente es una imagen de la entrada de datos.

La hoja NUDO, sigue fielmente el esquema de la unión F10B, si bien los cálculos de las características de sección acartelada se ajustan ahora a los de la sección 7.2.

En las hoja CHAPA además del mecanismo comprobado en el apartado 7.2, se chequea el mecanismo en el que están involucrados los tornillos de la fila superior. El mecanismo simplista que se estudia se corrige, como hasta aquí, con ayuda del factor ρ.

7.3.3 Notas finales

Las dos últimas fichas (F10B.xls y F20B.xls) se complementan con los siguientes ficheros.

1. F21B.xls, en el que se estudia una unión similar a la de F20B pero sin incluir la cartela. En su lugar se permite incluir un refuerzo de alma igual que el de la unión F10B. Obviamente para el correcto estudio de la unión se consideran las fuerzas de palanca Q siguiendo los mismos criterios que en la unión FB.
2. F30B.xls. Unión similar a la estudiada en este apartado pero con tres filas de tornillos, dos de ellas en el interior del perfil base. Es un híbrido, por tanto, de las dos anteriores.
3. F31B.xls en el que se estudia una unión similar a la anterior pero sin incluir la cartela. En su lugar se permite incluir un refuerzo de alma igual que el de la unión F10B. Obviamente para el correcto estudio de

la unión se consideran las fuerzas de palanca Q siguiendo los mismos criterios que en la unión FB.

4. F4*B.xls: similares a las F3*B y F2*B con cuatro filas de tornillos, tres de ellas en el interior del perfil base.

CÁLCULO DE UNIONES FRONTALES F208

TÍTULO/CÓDIGO 066631

02/02/2007 hoja 2/6

Solicitaciones de primer orden:

N_{Ed}	V_{Ed}	$M_{y,Ed}$
1274	337	-19,6

Segundo orden:

X	1/(X-1)	(1/X-1)/(X-A)	M_y
0,88	0,16	1,17	0

Solicitaciones totales:

N_{Ed}	$V_{y,Ed}$	$M_{y,Ed}$
1274	337	-19,6

Y_{max}	$N_{E,lim}$	$V_{E,lim}$	$M_{E,lim}$
1,4	910	241	-14

Perfiles:

Acero:

id	l_y	f_y	γ_M	f_{yd}
S355	355	510	1	355

Soldaduras:

a_f	a_w
7	4

Perfil base:

id	h	b	A	A_{vl}	$W_{el,y}$	t_f	t_w	r	h_i	h_s
HE180A	171	180	45,25	14,47	324,9	9,5	6	15	152	241,17

Diagonal:

id	h	b	A	A_{vl}	$W_{el,y}$	t_f	t_w	r	h_i	h_s
HE100A	96	100	21,24	7,56	83,0	8,0	5	12	80	151,2

Cartela:

b_c	h_c	z	A	z_{cdg}
13	85	10	1275	52,5

Chapa frontal:

Acero:

id	f_y	f_u	γ_M	f_{yd}
S355	345	510	1	345

Geometría:

b	h	t	g
310	330	30	15

μ
0,8

TR:

Acero TR:

id	f_y	f_u	γ_{M0}	$\gamma_{M2,int}$
A10.9	900	1000	1,25	1,1

TR fila 1:

id	d	d_0	A_s	A	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}'$	B_p	$F_{v,Rd}$	$F_{b,c}$	$F_{v,Rd,int}$	$F_{b,Rd,int}$
M27	27	30	459	573	330	275	0,031	256	321	146	626

TR fila 2:

id	d	d_0	A_s	A	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}'$	B_p	$F_{v,Rd}$	$F_{b,c}$	$F_{v,Rd,int}$	$F_{b,Rd,int}$
M27	27	30	459	573	330	275	0,031	256	321	146	626

Distancias:

TR fila 1:

id	n_b	e_b	p_b	m_b	n_h	e_h	p_h	m_h	Chk Σ(e_b..p_h)	x
M27	2	105	--	42,5	1	37	162	58	--	-143,5

TR fila 2:

id	n_b	e_b	p_b	m_b	n_h	e_h	p_h	m_h		x
M27	4	30	72	44	1	130	162	57,5	--	18,5

Perfil base:

id	z_{cdg}	z_{el}	z_{pl}
HE180A	85	69	180,5

Chk Σ(e_b..p_h)
--

Discretización del perfil base:

	b	h	z	f_{yd}	fi
ala superior	180	9,5	-80,8	355	607
alma	6	38	-57,0	355	81
alma	6	38	-19,0	355	81
alma	6	38	19,0	355	81
alma	6	38	57,0	355	81
ala inferior	180	9,5	80,8	355	607

figura 47: Hoja DATOS particularizada para el diseño 7.2.

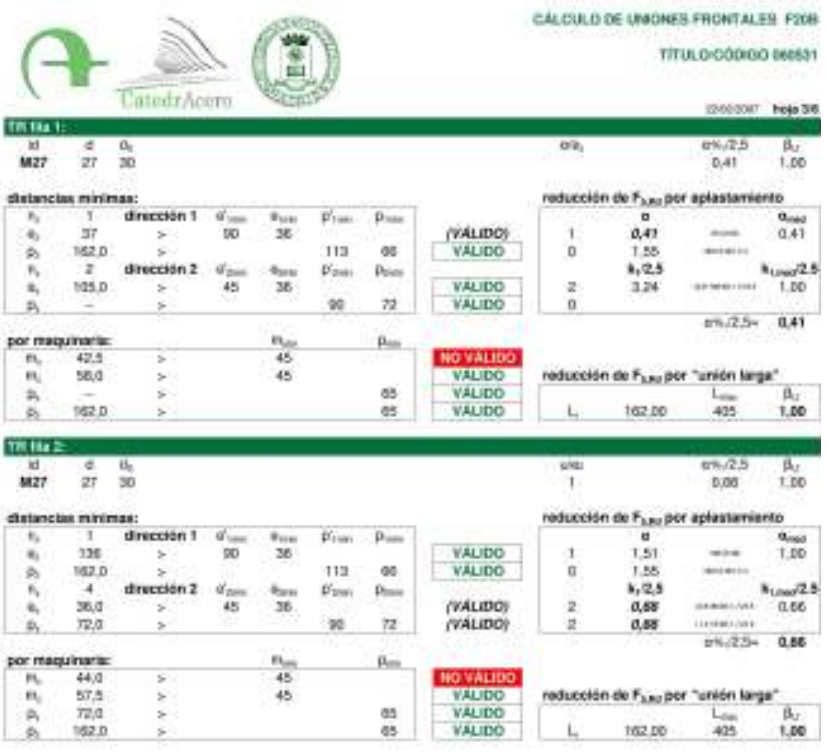


figura 48: Hoja DISTANCIAS particularizada para el diseño 7.2.

CÁLCULO DE UNIONES FRONTALES: F208

TÍTULO/CÓDIGO 060531

Hoja 4/8

Comprobación del alma y las alas del perfil base sin rigidizadores:

Anchura reducida del ala del perfil base:

b_{fb}		100		
b_{eff} (ala)		102,5		
		0,976	< 1	VÁLIDO

Area reducida del alma del perfil base particularizada para a_w=0.7 t_{fb}:

t_w b_{fb}		600		
t_w $b_{eff,1,wb}$ (alma)		679		
		0,910	< 1	VÁLIDO

Resistencia del perfil base:

$N_{b,Rd}$		1606,4		
n		0,793	< 1	VÁLIDO
$M_{c,y,Rd}$		115,3		
m		0,170	< 1	VÁLIDO

Comprobación de la interacción N/M:

a		0,244		
n_{lim}=(1-0,5·a)/m		0,942	< 1	VÁLIDO
$M_{N,y,Rd}$		27,2		
$M_{b,y,Ed}/M_{N,y,Rd}$		0,721	< 1	VÁLIDO
$V_{b,y,Rd}$		296,6		
v		1,136	< 1	NO VÁLIDO

Considerando eficaz a cortante el 100% de la superficie de las alas del perfil base (hipótesis plausible debido a la posición tan próxima de la diagonal y la chapa frontal), resulta la siguiente comprobación:

$V_{b,y,Rd}$		827,4		
v		0,363	< 0,5	VÁLIDO

Resistencia del perfil acartelado con rigidizador #15:

Comprobaciones directas:

$N_{b,Rd}$		2059,0		
n		**0,619**	< 1	VÁLIDO
$V_{b,y,Rd}$		557,9		
v		**0,604**	< 1	VÁLIDO
$M_{c,y,Rd}$		172,6		
m		**0,114**	< 1	VÁLIDO

Comprobación de la interacción M/V:

$\rho=(2V_{b,y}/V_{c,y,Rd}-1)^2$ si $V_{b,y}>0,5\cdot V_{c,y,Rd}$		0,043		
$M_{c,V,Rd}$		167,9		
$M_{b,y,Ed}/M_{c,V,Rd}$		0,117	< 1	VÁLIDO
m_y		0,973		
$1-m_y$		0,027		

Comprobación de la interacción M/N:

a		0,244		
$M_{c,y,Rd}$		75,0		
$M_{b,y,Ed}/M_{c,y,Rd}$		0,281	< 1	VÁLIDO
m_y		0,434		
$1-m_y$		0,566		

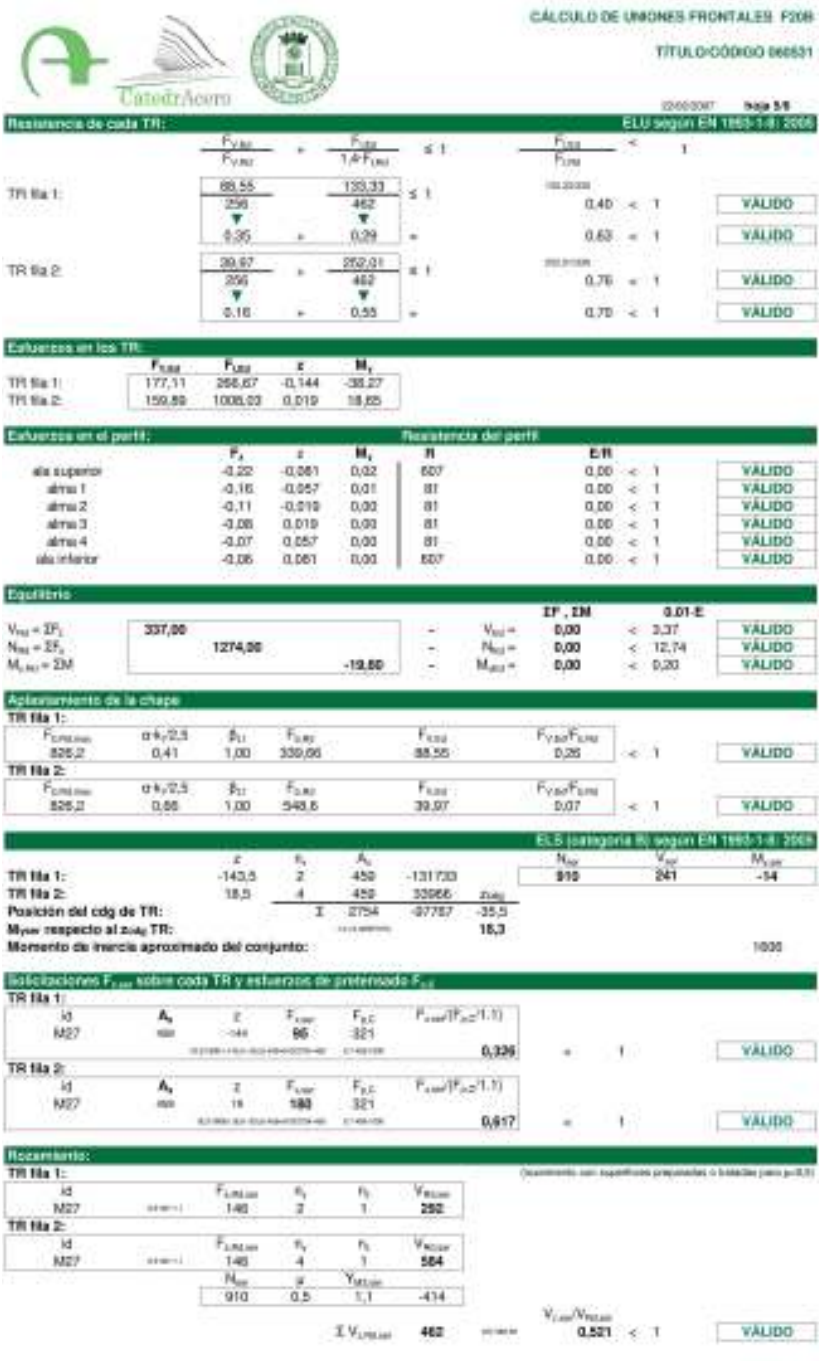
Comprobación de la interacción N/M/V

$M_{c,y,Rd}$		71,71		
$M_{b,y,Ed}/M_{c,y,Rd}$		0,273	< 1	VÁLIDO

Fórmula de interacción aproximada alternativa a la propuesta en EN 1993-1-1:2005 según el Anejo A2.3 del libro "Estructura de Edificación: Análisis Lineal y No Lineal", Aital 2002

$m_y+(1-m_y)\cdot(1-m_y)/m_y$		0,723	< 1	VÁLIDO
$M_{c,y,Rd}$		67,45		
$M_{b,y,Ed}/M_{c,y,Rd}$		0,291	< 1	VÁLIDO

figura 49: Hoja NUDO particularizada para el diseño 7.2.



CÁLCULO DE UNIONES FRONTALES F208

TÍTULO-CÓDIGO 066531

Hoja 5/6

Resistencia de cada TR: ELU según EN 1993-1-8: 2005

	$F_{V,Ed}/F_{V,Rd}$	+	$F_{t,Ed}/1,4F_{t,Rd}$	≤ 1	$F_{t,Ed}/F_{t,Rd}$	<	1	
TR fila 1:	88,55 / 256		133,33 / 462	≤ 1	0,40	<	1	VÁLIDO
	▼ 0,35	+	▼ 0,29	=	0,63	<	1	VÁLIDO
TR fila 2:	39,97 / 256	+	252,01 / 462	≤ 1	0,76	<	1	VÁLIDO
	▼ 0,16	+	▼ 0,55	=	0,70	<	1	VÁLIDO

Esfuerzos en los TR:

	$F_{V,Ed}$	$F_{t,Ed}$	z	M_z
TR fila 1:	177,11	266,67	-0,144	-38,27
TR fila 2:	159,89	1008,03	0,019	18,65

Esfuerzos en el perfil: / **Resistencia del perfil:**

	F_x	z	M_z	R	E/R			
ala superior	-0,22	-0,061	0,02	607	0,00	<	1	VÁLIDO
alma 1	-0,16	-0,057	0,01	81	0,00	<	1	VÁLIDO
alma 2	-0,11	-0,019	0,00	81	0,00	<	1	VÁLIDO
alma 3	-0,06	0,019	0,00	81	0,00	<	1	VÁLIDO
alma 4	-0,07	0,057	0,00	81	0,00	<	1	VÁLIDO
ala inferior	-0,06	0,061	0,00	607	0,00	<	1	VÁLIDO

Equilibrio:

					ΣF , ΣM		0,01·E	
$V_{Ed} = \Sigma F_z$	337,00			-	V_{Ed} =	0,00	< 3,37	VÁLIDO
$N_{Ed} = \Sigma F_x$		1274,00		-	N_{Ed} =	0,00	< 12,74	VÁLIDO
$M_{z,Ed} = \Sigma M$			-19,80	-	$M_{z,Ed}$ =	0,00	< 0,20	VÁLIDO

Aplastamiento de la chapa:

TR fila 1:

$F_{b,Rd,min}$	$\alpha_b = k_1/2,5$	β_{L1}	$F_{b,Rd}$	$F_{t,Ed}$	$F_{V,Ed}/F_{b,Rd}$			
826,2	0,41	1,00	339,06	88,55	0,26	<	1	VÁLIDO

TR fila 2:

$F_{b,Rd,min}$	$\alpha_b = k_1/2,5$	β_{L1}	$F_{b,Rd}$	$F_{t,Ed}$	$F_{V,Ed}/F_{b,Rd}$			
826,2	0,66	1,00	543,6	39,97	0,07	<	1	VÁLIDO

ELS (categoría B) según EN 1993-1-8: 2005

	z	n_v	A_v		z_{cdg}	N_{Ed}	V_{Ed}	$M_{y,Ed}$
TR fila 1:	-143,5	2	459	-131733		910	241	-54
TR fila 2:	18,5	4	459	33966				
Posición del cdg de TR:		Σ	2754	-97767	-35,5			
$M_{y,Ed}$ respecto al z_{cdg} TR:					18,3			
Momento de inercia aproximado del conjunto:								1030

Solicitaciones $F_{v,Ed}$ sobre cada TR y esfuerzos de pretensado $F_{p,C}$:

TR fila 1:

Id	A_s	z	$F_{v,Ed}$	$F_{p,C}$	$F_{v,Ed}/(F_{p,C}/1,1)$			
M27	459	-144	86	321	0,326	<	1	VÁLIDO

TR fila 2:

Id	A_s	z	$F_{v,Ed}$	$F_{p,C}$	$F_{v,Ed}/(F_{p,C}/1,1)$			
M27	459	19	180	321	0,617	<	1	VÁLIDO

Rozamiento:

(Rozamiento con superficies preparadas o tratadas para μ=0,5)

TR fila 1:

Id		$F_{v,Rd,ser}$	k_s	n_s	$V_{Rd,ser}$
M27		146	2	1	292

TR fila 2:

Id		$F_{v,Rd,ser}$	k_s	n_s	$V_{Rd,ser}$
M27		146	4	1	584

N_{Ed}	μ	$\gamma_{M3,ser}$
910	0,5	1,1
		-414

$\Sigma V_{v,Rd,ser}$ 462 $V_{v,Ed}/V_{Rd,ser}$ 0,521 < 1 VÁLIDO

figura 50: Hoja FB particularizada para el diseño 7.2.

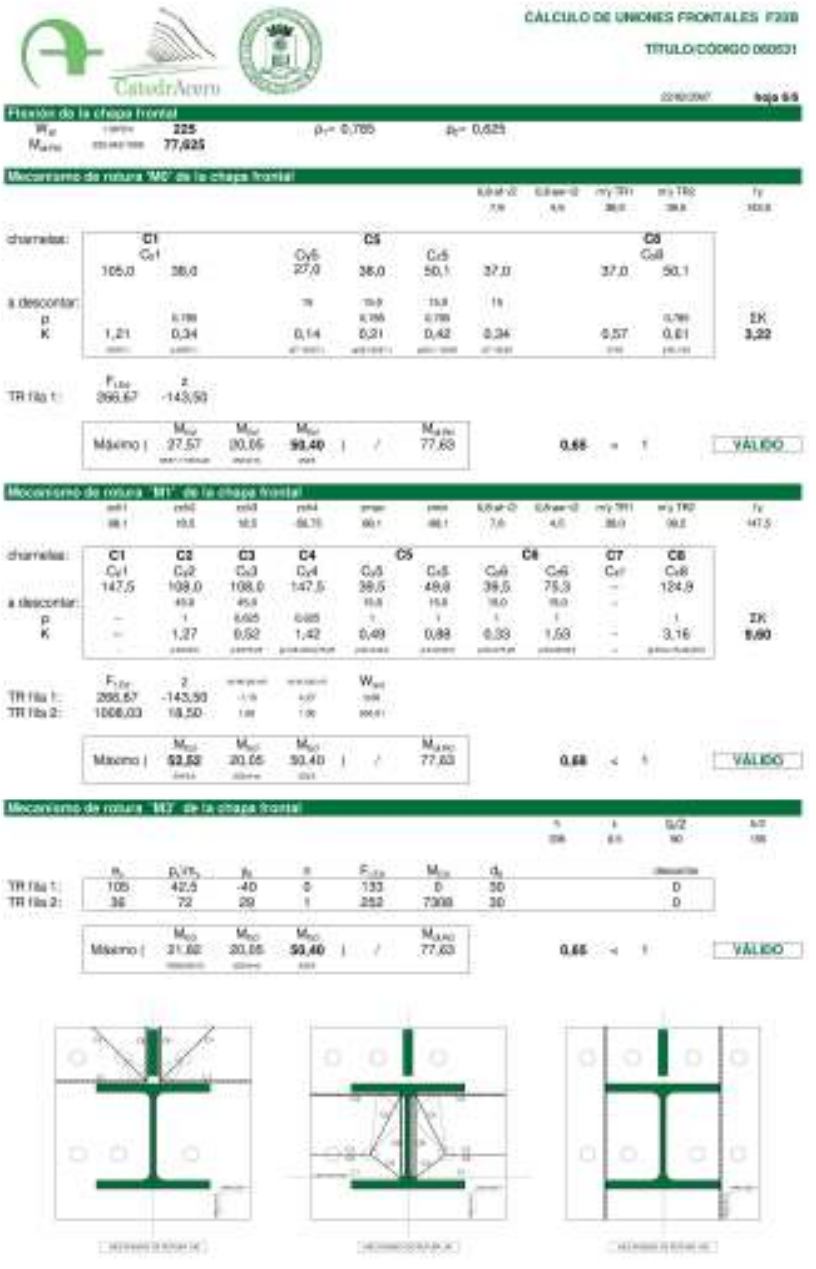


figura 51: Hoja CHAPA particularizada para el diseño 7.2.

7.4 RECOMENDACIONES SOBRE CONTROL DE CALIDAD

En las uniones traccionadas “asimétricas” debe hacerse hincapié en el control geométrico de las ubicaciones de los tornillos: Pequeñas variaciones numéricas de las posiciones de los tornillos pueden conducir a cambios de orden de magnitud considerable en los "coeficientes de utilización" de la unión, es decir, su seguridad es muy sensible frente a las tolerancias admitidas en las posiciones reales de los tornillos

Es prioritario en las uniones traccionadas establecer controles fiables de los esfuerzos de pretensado reales de los tornillos: homologación del procedimiento de apriete en función del estado real de suministro de tornillos y tuercas, y control in situ de dicho estado real, ya que si el pretensado es defectuoso:

- Los estados límite de servicio se pueden ver comprometidos con riesgo de aberturas de la unión
- Ídem con riesgo de deslizamientos, cuando las solicitaciones de tracción coexisten con esfuerzos cortantes elevados.
- Puede perjudicar incluso la seguridad ante los estados últimos (roturas de tornillos por aprietes inadecuados).

Actualmente no está extendido el uso de indicadores directos del esfuerzo de pretensado de cada tornillo, como pueden ser determinadas arandelas especiales usuales en el Reino Unido (A.Hayward, F.Weare: "Steel Detailers'Manual", Blackwell, London, 2002: fig.1.26; datos del principal fabricante constan en el texto citado).

Especialmente en el caso **b** habrá que prestar especial atención al estricto cumplimiento de los coeficientes de rozamiento especificados en el proyecto. Hay que tener en cuenta que el rozamiento se ve disminuido en toda la unión por las solicitaciones exteriores de tracción, (sin la contrapartida de su aumento en un "bloque comprimido" en este caso inexistente).

La resistencia de la chapa frontal normalmente en este tipo de uniones será crítica, por lo que frecuentemente será necesario adoptar chapas de espesores elevados. En tal caso convendrá especificar ensayos ultrasónicos complementarios de ausencia de "defecto de hoja" (cuestión que no deja de ser importante aun estando el espesor de las chapas "cosido" por los tornillos), así como procedimientos apropiados de soldadura del perfil a la chapa en taller.

Si es necesario disponer más de dos tornillos por fila las uniones anchas resultantes son relativamente susceptibles de desajustes de las superficies en contacto. Deberán especificarse las tolerancias de huelgos admitidos, y prever soluciones para posibles huelgos excesivos (dentro de un orden) cuando pudieran comprometer la seguridad y/o la durabilidad de la unión, por ejemplo mediante forros o "peines" incluidos a posteriori (EAE, M.F., 2006: 76.7 y 80; prEN 1090-2:2006-10, artículo 8.1).

8 BIBLIOGRAFÍA PARA CONSULTA.

CÓDIGOS europeos de carácter general sobre estructuras de acero.

EN 1993-1-8:2005 y 1-1/A1: Eurocódigo núm.3, "Proyecto de Estructuras de Acero".

UNE-ENV 1994-1-1: Eurocódigo núm.4, "Proyecto de Estructuras Mixtas de Hormigón y Acero", AENOR, Madrid, 1995.

CÓDIGOS españoles de carácter general sobre estructuras de acero.

EAE: "Instrucción de Acero Estructural", Documento 1, Ministerio de Fomento, Madrid, 2006.

Instrucción e.m.62 para estructuras de acero. Normas y Manuales del Instituto Eduardo Torroja, Madrid, 1976.

NBE EA-95. Estructuras de acero en edificación. Real Decreto 1829/1995, de 10 de noviembre. Ministerio de Obras Públicas, T. y M. A., Madrid, 1996.

CTE. Código técnico de la edificación. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. Ministerio de Vivienda, Madrid, 2006).

Normas UNE: "Ejecución de estructuras de acero", tomo 2, Bellisco, Madrid, 2000.

PG-3: "Pliego de prescripciones técnicas generales: Parte 6, Capítulo III: Estructuras metálicas", LITEAM, Madrid, 2002.

RPM-95: Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras", Ministerio de Fomento, Madrid, 1996.

RPX-95: Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras", Ministerio de Fomento, Madrid, 1996.

Manuales sobre DETALLES constructivos en acero.

O.W.Blodgett: "Design of welded structures", J.F.Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, 1976.

A.Hayward, F.Weare: "Steel Detailers'Manual", Blackwell, London, 2002.

PRONTUARIOS.

F.Cobb: "Structural Engineer´s Pocket Book", Elsevier, Amsterdam, 2004.

Ensidesa: "Manual para cálculo de estructuras metálicas", tomo II**, 1975.

K.Thomas (ed.): "El acero en la construcción", trad. de Stahl im Hochbau, Reverté, Barcelona, 1972.

Textos CLÁSICOS sobre estructuras metálicas.

L.S.Beedle (ed.): "Structural Steel Design", Ronald Press, N.Y., 1964.

F.S.Merrit (ed.): "Structural Steel Designers'Handbook", McGraw-Hill, 1972.

B.Sahling, K.Latzin, Kκ = eimers: "La técnica de la soldadura en la ingeniería de construcción", Blume, Barcelona, 1970.

V.Zignoli: "Costruzioni metalliche", UTET, Torino, 1967

Textos MODERNOS sobre estructuras de acero.

R. Arguelles Álvarez, R. Arguelles Bustillo, F. Arriaga, J.R. Atienza: "Estructuras de acero", 2 tomos, Bellisco, Madrid, 1999 y 2001.

Textos recientes de ANÁLISIS con aplicaciones a estructuras metálicas.

J.Ortiz, J.I.Hernando: “Estructuras de edificación: análisis lineal y no lineal”, Ariel, Barcelona, 2002

Diversas herramientas que pueden localizarse en internet con aplicaciones a estructuras metálicas.

figura 52: Ejemplo de uso de un buscador de normas une sobre construcción metálica

figura 53: Ejemplo de uso de un buscador de normas une sobre construcción metálica

figura 54: Ejemplo de uso de “access-steel”

figura 55: Ejemplo de uso de “access-steel”.

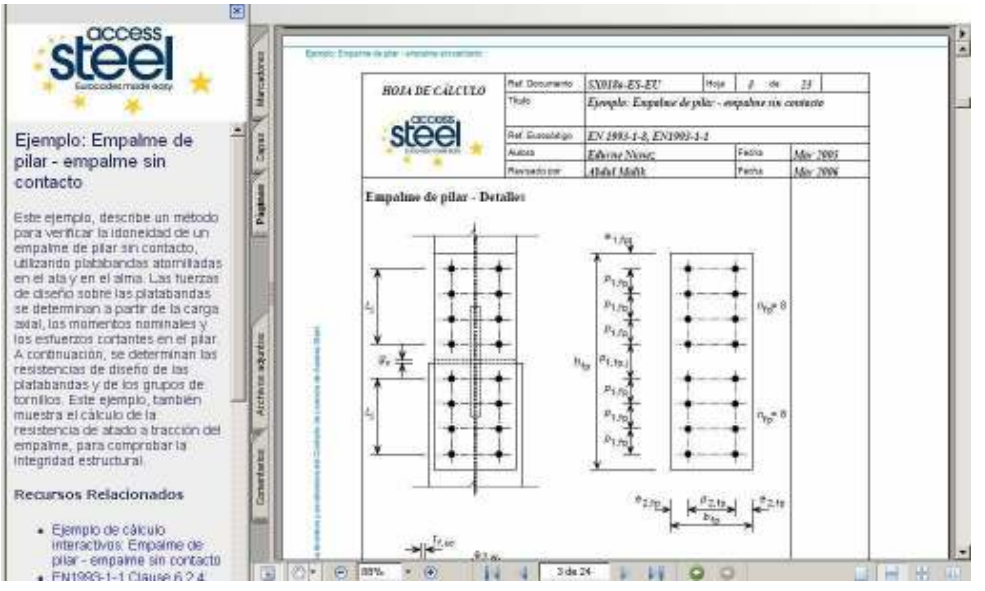


figura 56: Ejemplo de uso de “access-steel”.

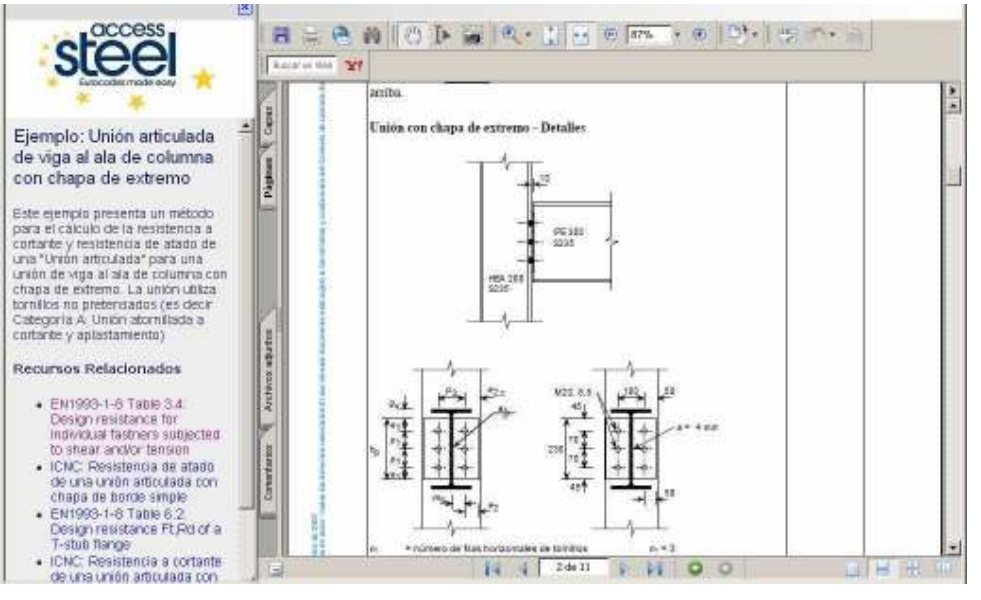


figura 57: Ejemplo de uso de “access-steel”.

figura 58: Página principal de CátedrAcero

figura 59: Página principal de APTA